

## 修 士 論 文 の 和 文 要 旨

|   |   |      |         |
|---|---|------|---------|
| 研究科・専攻  | 大学院 情報理工学研究科 情報・通信工学専攻 博士前期課程             |      |         |
| 氏 名   | 荒船 健人                                     | 学籍番号 | 1331006 |
| 論 文 題 目   | 南極昭和基地における VLF 帯送信電波を用いた電離層擾乱の観測可能性に関する調査 |      |         |
| <p style="text-align: center;">要 旨</p> <p>地球の大気の状態を観測する手法として、電離層上部の観測に適する宇宙空間から衛星を使用するものや成層圏の観測に適する気象観測気球を打ち上げるもの等がある。しかしどちらの手法も下部電離層と呼ばれる高度 50 km ~ 100 km 付近の電離層の観測には適していない。下部電離層を観測する手法としては、電波を使用するものやロケットを打ち上げ観測するものがある。このうち、ロケットを用いる手法では観測が一時的なものとなり常時観測には向いていないため、下部電離層の観測には電波を使用する手法が広く行われている。</p> <p>VLF 帯のような波長が長い電波は大地と電離層の間を反射しながら非常に長い距離を伝搬する。伝搬路内で発生した電離層擾乱は、受信局において位相や振幅の異常として観測される。下部電離層の擾乱要因には雷から放射される電磁波による下部電離層直接加熱や雷起源ホイッスル波による高エネルギー荷電粒子降下、極域における宇宙からの荷電粒子の降下があり、電離層の擾乱を解析することでこれらの現象と電離層擾乱の関係、電離圏・磁気圏との相互作用の解明につながることを期待されている。</p> <p>電気通信大学では主に日本国内に VLF 帯電波受信設備を設置しており 24 時間観測を行っている。しかし中緯度で受信する事により伝搬経路の解析が複雑になってしまう。また、電離層擾乱の主要な要因と考えられる雷が盛んな世界三大雷地域である東南アジア、アフリカ、アメリカを伝搬経路に含みづらいことや極域の観測が難しいという課題もある。そこで、新たに高緯度である南極に VLF 帯電波受信設備を設置し新たな電離層擾乱観測システムを構築することを計画した。</p> <p>本研究では南極に受信施設を設置する前に、現地で受信可能な送信局等、受信状況の調査を行った。受信施設を設置する予定である南極昭和基地近くの西オングル島において 2008 年および 2014 年に観測したデータを解析することで、受信できると考えられる送信局の同定を行った。その結果、欧州の多くの送信局やオーストラリアの送信局等を受信できることがわかった。また欧州の送信局との間に世界三大雷地域であるアフリカを含んでいることがわかった。</p> |   |      |         |

平成 26 年度 修士論文

南極昭和基地における VLF 帯送信電波を用いた  
電離層擾乱の観測可能性に関する調査

学籍番号 1331006

氏名 荒船 健人

情報・通信工学専攻

電子情報システムコース

指導教員 芳原 容英 教授

副指導教員 橋本 猛 教授

# 概要

地球の大気の状態を観測する手法として、電離層上部の観測に適する宇宙空間から衛星を使用するものや成層圏の観測に適する気象観測気球を打ち上げるもの等がある。しかしどちらの手法も下部電離層と呼ばれる高度 50 km ~ 100 km 付近の電離層の観測には適していない。下部電離層を観測する手法としては、電波を使用するものやロケットを打ち上げ観測するものがある。このうち、ロケットを用いる手法では観測が一時的なものとなり常時観測には向いていないため、下部電離層の観測には電波を使用する手法が広く行われている。

VLF 帯のような波長が長い電波は大地と電離層の間を反射しながら非常に長い距離を伝搬する。伝搬路内で発生した電離層擾乱は、受信局において位相や振幅の異常として観測される。下部電離層の擾乱要因には雷から放射される電磁波による下部電離層直接加熱や雷起源ホイスラ波による高エネルギー荷電粒子降下、極域における宇宙からの荷電粒子の降下があり、電離層の擾乱を解析することでこれらの現象と電離層擾乱の関係、電離圏・磁気圏との相互作用の解明につながる事が期待されている。

電気通信大学では主に日本国内に VLF 帯電波受信設備を設置しており 24 時間観測を行っている。しかし中緯度で受信する事により伝搬経路の解析が複雑になってしまう。また、電離層擾乱の主要な要因と考えられる雷が盛んな世界三大雷地域である東南アジア、アフリカ、アメリカを伝搬経路に含みづらいことや極域の観測が難しいという課題もある。そこで、新たに高緯度である南極に VLF 帯電波受信設備を設置し新たな電離層擾乱観測システムを構築することを計画した。

本研究では南極に受信施設を設置する前に、現地で受信可能な送信局等、受信状況の調査を行った。受信施設を設置する予定である南極昭和基地近くの西オングル島において 2008 年および 2014 年に観測したデータを解析することで、受信できると考えられる送信局の同定を行った。その結果、欧州の多くの送信局やオーストラリアの送信局等を受信できることがわかった。また欧州の送信局との間に世界三大雷地域であるアフリカを含んでいることがわかった。

# 目次

|   |    |
|---|----|
| <b>第1章 まえがき</b> .....                   | 1  |
| 1.1 研究の背景 .....                         | 1  |
| 1.2 現状の課題と目的 .....                      | 2  |
| 1.3 原理 .....                            | 4  |
| 1.3.1 VLF 帯電波の伝搬 .....                  | 4  |
| 1.3.2 日変化とターミネータ・タイム .....              | 6  |
| 1.3.3 ループアンテナ .....                     | 7  |
| <b>第2章 2008 年のデータ解析</b> .....           | 9  |
| 2.1 2008 年のデータについて .....                | 9  |
| 2.2 解析の流れ .....                         | 9  |
| 2.3 日変化とターミネータ・タイムによる送信局の同定 .....       | 13 |
| 2.4 同定の結果 .....                         | 16 |
| 2.5 2008 年のデータ解析の問題点 .....              | 17 |
| <b>第3章 2014 年のデータ解析</b> .....           | 18 |
| 3.1 2014 年のデータについて .....                | 18 |
| 3.2 解析の流れ .....                         | 19 |
| 3.3 日変化の作成 .....                        | 23 |
| 3.4 ターミネータ・タイムによる送信局の同定 .....           | 26 |
| 3.5 東西成分と南北成分の比による送信局の同定 .....          | 31 |
| 3.6 2014 年のデータの同定結果 .....               | 36 |
| <b>第4章 結論と将来の展望</b> .....               | 37 |
| 4.1 2008 年と 2014 年のデータによる各送信局受信状況 ..... | 37 |
| 4.2 将来の展望 .....                         | 38 |

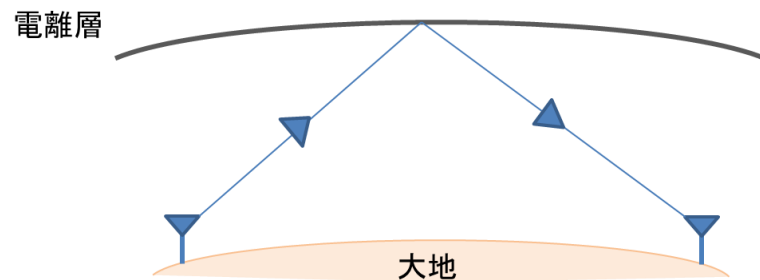


# 第1章 まえがき

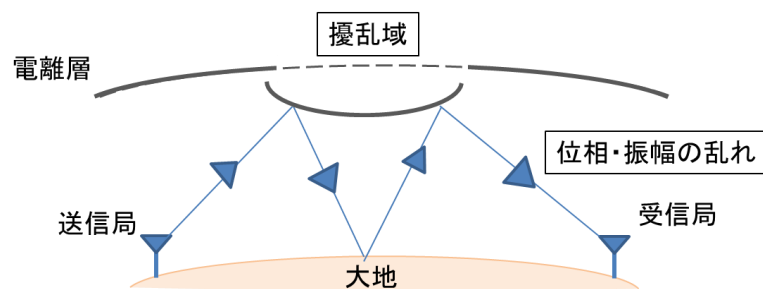
## 1.1 研究の背景

大地から高度 50 km ~ 400 km 付近に存在する電離層は雷活動や極域における宇宙空間からの高エネルギー荷電粒子降下により擾乱を起こすことがわかっている<sup>(1)</sup>。また、大きな地震の前兆現象として電離層の擾乱が発生するという報告もある<sup>(2)</sup>。つまり、電離層の状態を観測、解析することで、地球規模で発生するこれらの物理現象の発生機構の解明につながる可能性がある。

電離層を観測する方法として電波を用いるものがある。VLF 帯のように波長が長い電波は、良導体である大地と電離層の間を反射しながら長距離を伝搬する。もし伝搬路付近において電離層擾乱が発生していれば、送信局からの VLF 帯電波は受信局において位相や振幅の異常として観測される<sup>(2)</sup>。VLF 帯電波を常時観測し、通常時との差異を解析することで間接的に電離層の状態を把握する事ができる。



(a) 通常の伝搬経路イメージ



(b) 異常時の伝搬経路イメージ

図 1.1 電離層擾乱と伝搬経路の変化のイメージ

## 1.2 現状の課題と目的

現在、電気通信大学では日本国内に 7 箇所(北海道の母子里と中標津、東京都調布市と三宅島、愛知県春日井市、岡山県津山市、高知市)、国外に 3 箇所(台湾 2 点、インドネシア 1 点)の VLF 帯電波の受信局を設置し、24 時間連続観測を行っており、主に日本周辺上空の電離層擾乱研究に関連して、これまでに素晴らしい成果をあげている。しかし、中緯度に位置する日本国内の受信局と、世界に分布する VLF 帯電波送信局との電波伝搬路は東西にまたがったものとなる。図 1.2 に電気通信大学の電離層擾乱観測ネットワークの位置を示す。

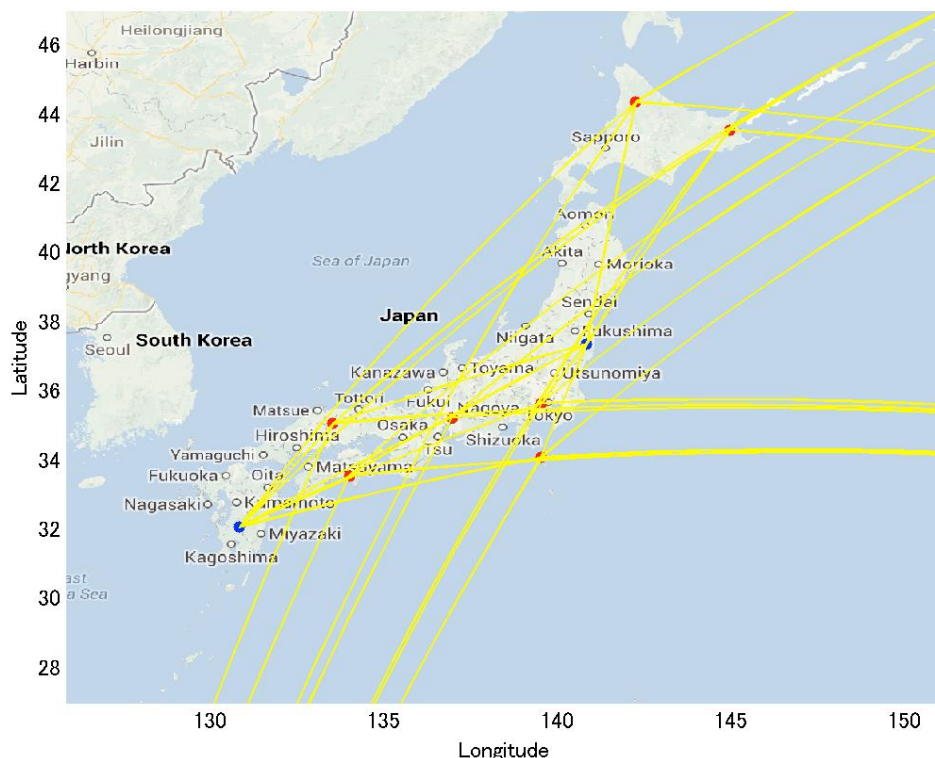


図 1.2 電気通信大学が運用している電離層擾乱観測ネットワーク

地球の自転により、東西方向に伝搬する電波はその方角によって伝搬特性が異なることがわかっており、また、赤道を越える伝搬経路では昼間と夜間を超える伝搬で特性が異なる<sup>(3)</sup>。このことが、東西にまたがって伝搬する電波の解析を複雑なものにする。また、東西にまたがって伝搬する電波は、異なる経度における電離層の情報を含んでおり、どの経度の電離層の情報なのかわからないという障害もある。

本研究では、高緯度である南極の昭和基地周辺に新たな受信拠点を開設することで世界中の VLF 帯電波送信局との間に南北方向のみで構成される伝搬経路を構築する。図 1.3 に昭和基地を中心とした方位図と主な VLF 帯電波送信局の位置を示す。伝搬経路が南北方向のみで構築されるため、南北伝搬方向の特性を考慮すれば電波の到来方向による伝搬特性の違いを考慮する必要がなくなり、擾乱の把握が容易になる。また、伝搬路の経度を把握することが可能なため、世界中

に分布する送信局からの VLF 帯電波を各々解析することで、全世界同時観測が可能となる。更に、擾乱の主な要因である雷活動が盛んな世界三大雷活動域(東南アジア、アフリカ、アメリカ)を伝搬路に含んでいるので、世界雷活動と電離層擾乱の関係の調査が可能である。将来は、雷から放射される電磁波による下部電離層直接加熱と電離層擾乱の関係や、雷起源ホイッスル波や極域での高エネルギー荷電粒子降下と電離圏・磁気圏の相互作用、高エネルギー天文学的事象による電離層の擾乱の解明に活用する。

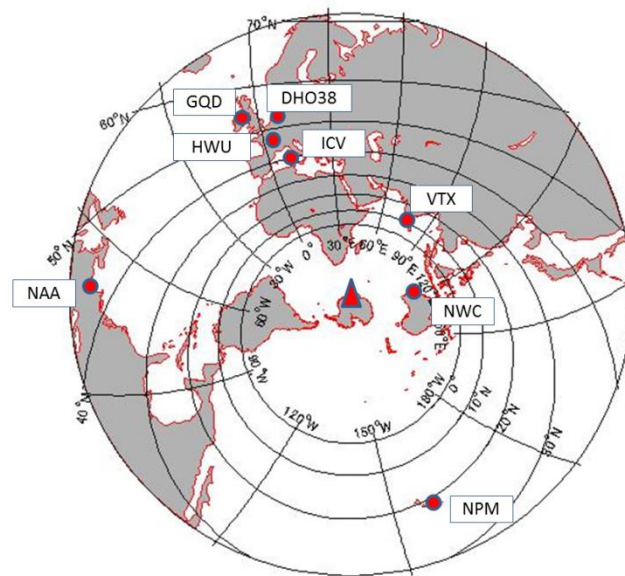


図 1.3 昭和基地を中心とする正距方位図と主な VLF 帯電波送信局の位置



## 1.3 原理

### 1.3.1 VLF 帯電波の伝搬

電波の伝搬は地上波と上空波に分類できる。図 1.4 に電波の伝搬経路を示す。地上波とは、大地表面に沿って伝搬する地表波や、大地や電離層の影響を受けずに見通し距離内で伝搬する直接波、大地で反射して伝搬する大地反射波などのことである。一方の上空波とは電離層で反射または散乱して伝搬する電離層反射波、電離層散乱波である。30 MHz 以上の VHF 帯より周波数が高い電波は電離層で反射されないため地上波が主な伝搬電波である。一方、それより低い周波数の電波は、図 1.4 のように電離層で反射され、良導体である大地との間を反射しながら長距離伝搬する。これを大地・電離層導波管伝搬と呼ぶ。

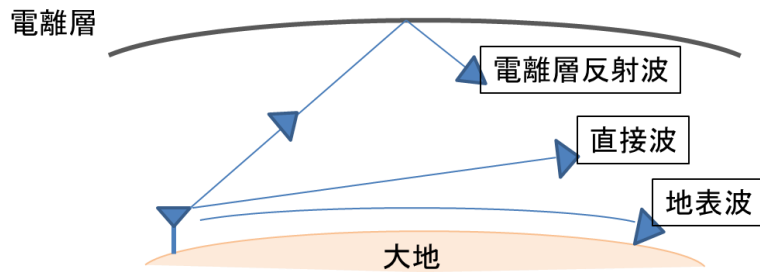


図 1.4 電波の伝搬経路

電波が電離層で反射するかどうかは、電波の周波数と電離層の電子密度に左右される。電子の電荷 $e$ 、その質量 $m$ 、電離層の電子密度 $N$ 、電波の周波数 $f$ 、角周波数 $\omega$ であるとき電離層内における電波の屈折率 $n$ は式(1.1)で表される。

$$n = \sqrt{1 - \frac{e^2 N}{\epsilon_0 m \omega^2}} \doteq \sqrt{1 - \frac{80.6 N}{f^2}} \quad (1.1)$$

ここで $n = 0$ 、つまり電子密度 $N$ における屈折の頂点であり、すなわちその密度の層が反射点となる電波の周波数 $f_N$ を求めると式(1.3)となる。

$$N = \frac{1}{80.6} f_N^2 \quad (1.2)$$

だから、

$$f_N \doteq 9\sqrt{N} \quad (1.3)$$

$f_N$ をプラズマ周波数という。電離層の電子密度は高度が高いほど大きいため、周波数が高い電波ほど密度が大きい上空まで到達することを示している。VHF 帯電波のように電波が非常に高い電波は、最も電子密度が大きい層においても屈折率が 0 にならないため電離層で反射しきれずに更に上空へと透過することになる。

電離層は高度が高いほど電子密度が大きくなるが、これは上空ほど電離の要因となる太陽の影響を強く受けるためである。電離層はその電子密度により高度が低い層から D 層、E 層、F1 層、

F2 層に分類できる。本研究が対象とする VLF 帯電波は最も電子密度が小さい D 層でも良く反射するが、D 層が夜間に消滅するため夜間は E 層で反射する。図 1.5 に電離層の構成図を、図 1.6 に各周波数帯の反射層を示す。

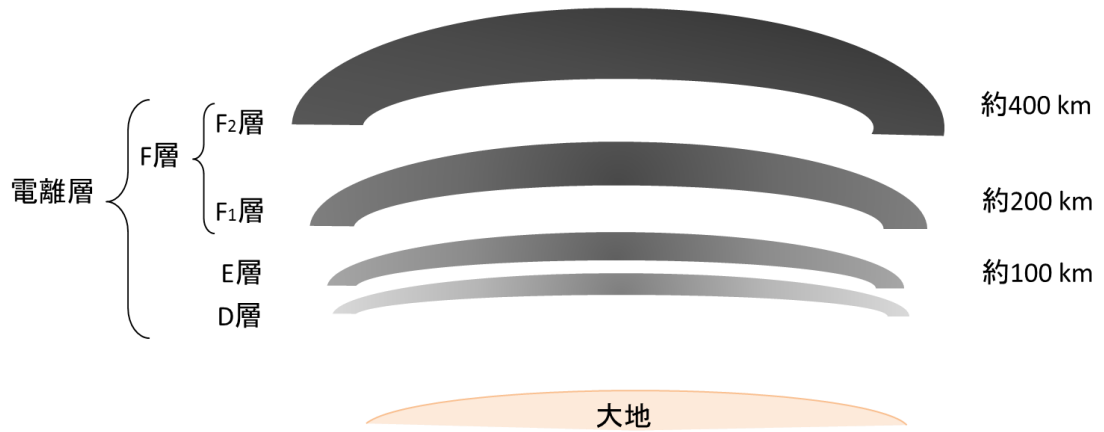


図 1.5 電離層の構成

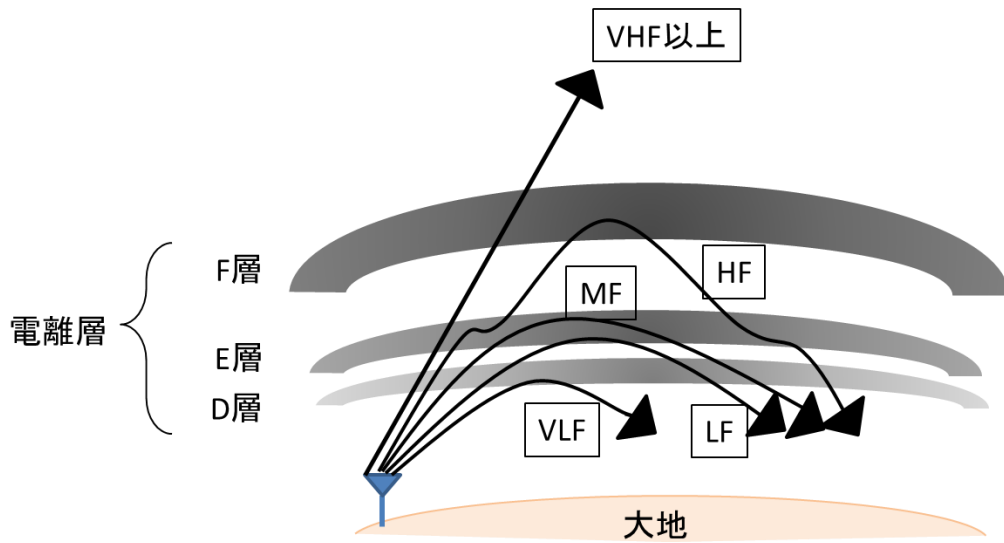


図 1.6 各周波数帯の反射層

### 1.3.2 日変化とターミネータ・タイム

電離層と大地の間を反射しながら伝搬する VLF 帯電波は電離層の状態の影響を強く受ける。前説で記述したように電離層の発生要因は太陽からのエネルギーであり、VLF 帯電波が反射する D 層は夜間に消滅する。つまり、VLF 帯電波の伝搬路が昼間と夜間で変化する。また、太陽からのエネルギーを受ける昼間は比較的安定した状態を維持し、太陽光が当たらない夜間は電離状態を安定に維持できず不安定になる。このため、VLF 帯電波は昼間と夜間で受信レベルが変化し、夜間は昼間より不安定な挙動を示す。

昼間と夜間の変化だけでなく、日の出や日没の付近で電界強度の振幅と位相が低下する時刻があることが知られている。この時刻はターミネータ・タイムと呼ばれ、日の出付近のものをターミネータ・タイム・モーニング、日没付近のものをターミネータ・タイム・イブニングと呼ぶ。ターミネータ・タイムが生じる要因は地上波と上空波の干渉であると考えられている。VLF 帯電波は低い高度を伝搬する地上波と電離層と大地の間を反射しながら伝搬する上空波により伝搬するが、日の出や日没により電離層の状態が変化し、電波が反射する高度が変動することでこれらの伝搬波が逆位相となり受信電界強度が低下するのである<sup>(5)</sup>。図 1.7 に電気通信大学が観測した日変化とターミネータ・タイムの例を示す。

これらの昼間と夜間の変化やターミネータ・タイムを確認することで、電波伝搬路の状態を把握することが可能である。つまり、常時観測することで、これらの日変化が異常を示すために電波伝搬路の異常を確認できることになる。本研究では日変化とターミネータ・タイムを送信局の同定に用いる。

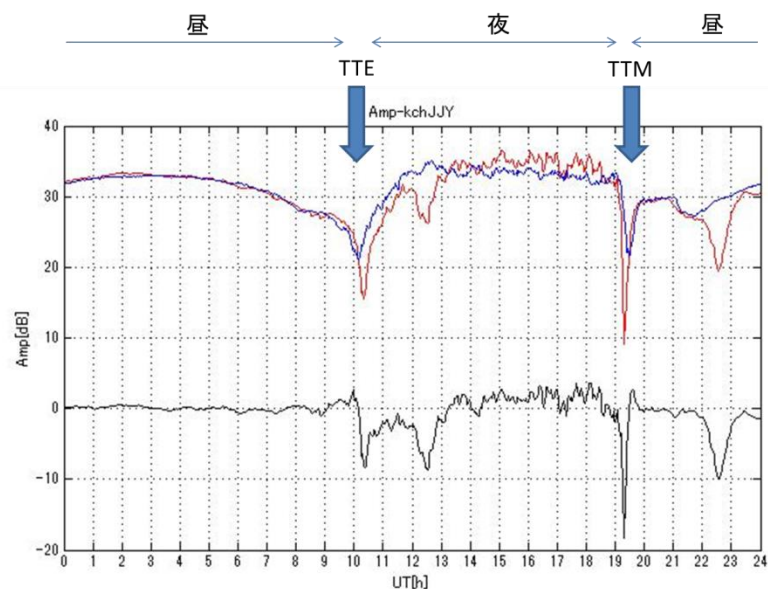


図 1.7 VLF 帯電波受信の日変化とターミネータ・タイムの例

### 1.3.3 ループアンテナ

観測に使用したアンテナは磁気ループアンテナである。巻き数 $N$ 、ループの面積 $A[\text{m}^2]$ のループアンテナに、ループ面から角度 $\theta$ の方角から電波が到来すると考える。電波の電界 $E$ と磁界 $H$ は電波の進行方向と垂直であるから図 1.8 のようになる。ループ面に直交する磁界成分は図 1.9 より  $H \cos \theta$  となるから、ループに誘起される起電力 $e[\text{V}]$ は式(1.4)となる。

$$e = -\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{d}{dt} NA\mu_0 H \cos \theta \quad (1.4)$$

$\varphi$ は鎖交する磁束数である。電波の角周波数 $\omega = 2\pi f$ 、および磁界の振幅を $H_0[\text{A/m}]$ 、電界の振幅を $E_0[\text{V/m}]$ とすれば、

$$e = -NA\mu_0 H_0 \cos \theta \frac{d}{dt} \cos \omega t = \omega NA\mu_0 H_0 \cos \theta \sin \omega t \quad (1.5)$$

ここで、

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi c}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = \frac{2\pi}{\lambda\mu_0} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = \frac{2\pi E_0}{\lambda\mu_0 H_0} \quad (1.6)$$

だから、

$$e = \frac{2\pi NA}{\lambda} E_0 \cos \theta \sin \omega t \quad (1.7)$$

となる電界 $e[\text{V/m}]$ が誘起される。

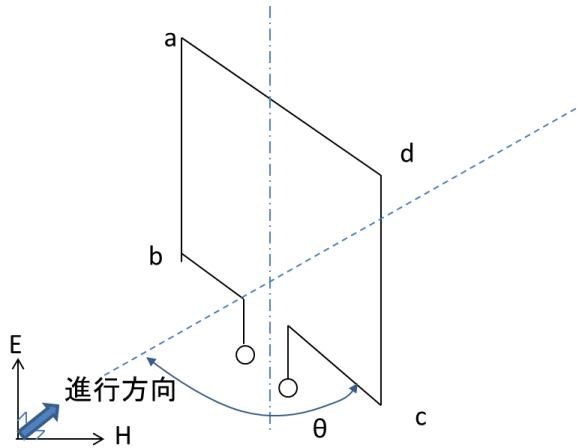


図 1.8 ループアンテナと電波の進行方向

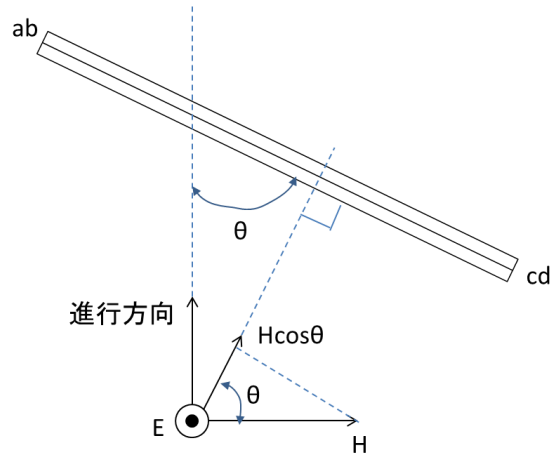


図 1.9 ループ面と進行方向の角度と磁界の垂直成分

式(1.7)からわかるようにループ面に対して磁界が垂直のときに誘起電圧が最大となる。これはループ面に対して電波の進行方向が平行の場合である。一方、ループ面に対して垂直な方角から到来する電波に対してはループと鎖交する磁束数が 0 となるため誘起電圧は 0 となる。単一ループアンテナの指向性を描画すると図 1.10 のようになる。

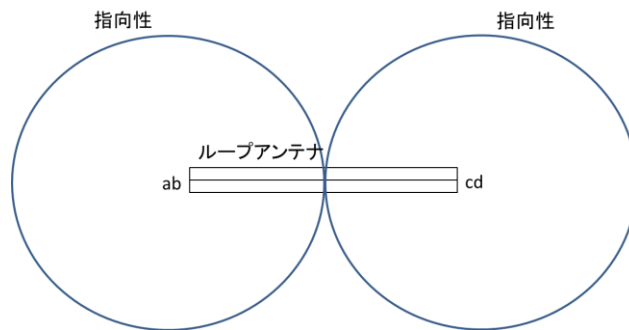


図 1.10 ループアンテナの指向性

## 第 2 章 2008 年のデータ解析

### 2.1 2008 年のデータについて

新規に南極で観測を開始する前に 2008 年に南極のオングル島で観測したデータを解析した。データの諸元を表 2.1 に示す。観測期間は 2008 年から 2009 年である。しかし、欠測等により解析に使用できるデータは 2008 年 6 月 17 日 ~ 8 月 6 日、8 月 19 日 ~ 12 月 10 日であり、その中でも連続した観測期間は 1 ヶ月程度である。

観測は 0.1 秒毎に 1 回行い 1024 点の値を取得しているが、データが連続していないため解析に使用できるポイント数の上限も観測毎の 1024 点である。このデータのサンプリング周波数は 200 kHz であるため解析可能な周波数の上限は 100 kHz となり、解析に使用するポイント数が 1024 点であるため周波数分解能はおよそ 0.195 kHz となる。ループアンテナ 1 基を使用したため観測成分は水平磁界 1 成分である。解析に用いたデータの収録時にループの指向方向が東西方向を向いていたのか南北方向を向いていたのかは記録が残っていないため不明である。

表 2.1 2008 年のデータ諸元

|               |                                    |
|---------------|------------------------------------|
| 観測場所          | 南極西オングル島                           |
| 観測期間          | 2008 年 ~ 2009 年<br>解析使用分: 6 月 3 週間 |
| サンプリング周波数     | 200 kHz                            |
| 1 観測あたりのポイント数 | 1024                               |
| 周波数分解能        | およそ 0.195 kHz                      |
| 解析可能な周波数範囲    | 0 ~ 100 kHz                        |
| 使用したアンテナ      | ループアンテナ 1 基                        |
| 観測成分          | 水平磁界 1 成分                          |

### 2.2 解析の流れ

データ解析は図 2.1 に示すようなプロセスで行う。

プロセス①のノイズとは雷放電による電磁放射等である。観測された波形データに連続フーリエ変換を施して得られた周波数スペクトログラムの一例を図 2.2 に示す。図 2.2 より、特定の時間に全周波数領域にまたがるように信号が乗っていることがわかる。特定の周波数全時間乗っている信号は受信した電波であると考えられる。このデータからパルス状のノイズを取り除き VLF/LF 帯送信電波等の特定の周波数にて連続した信号を効果的に取り出すためにフィルタ処理を行う。使用したフィルタは中央値フィルタであり、各周波数ごとに 1 分間の中央値フィルタをかける。その後、2 分毎にデータを取り出し改めて描画すると図 2.3 のようになる。いくつかの受信電波を取り出せていることがわかる。

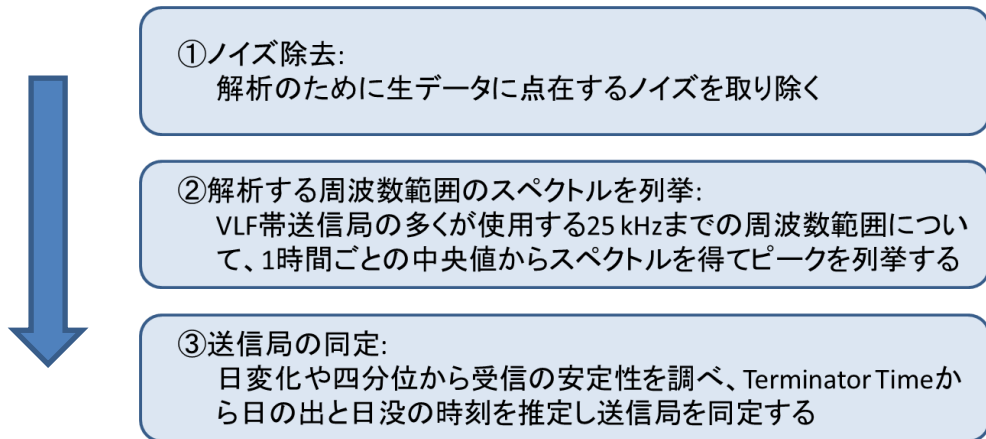


図 2.1 2008 年のデータの解析の流れ

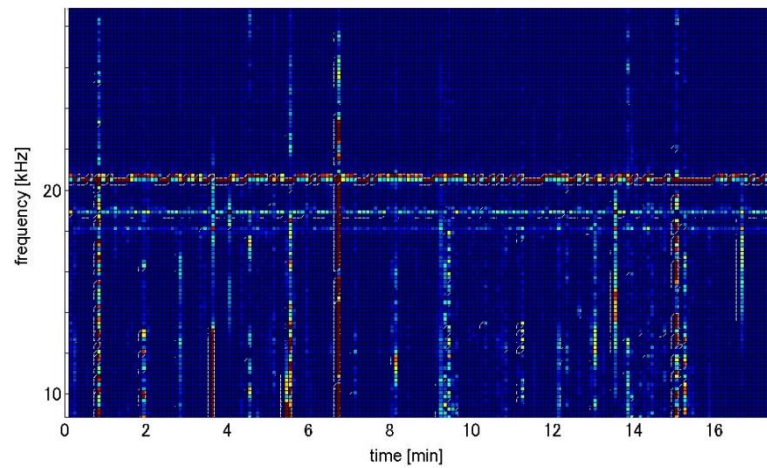


図 2.2 磁界データの周波数スペクトログラムの例

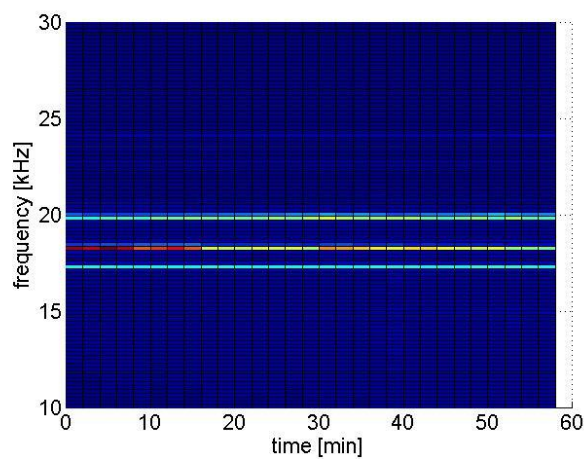


図 2.3 フィルタを通した磁界データの周波数スペクトログラムの例

プロセス②では、まず解析する周波数範囲を決定する。使用したデータの解析可能な周波数の上限は 100 kHz であるが、本研究が対象とする VLF 帯送信電波局からの送信周波数帯を考慮して、また、今後南極で観測を行っていく上で、周波数の上限が高いほど観測機器のサンプリング周波数を高くする必要がありデータサイズが大きくなる事を考慮し、25 kHz 以下の周波数を対象として解析を行う。10 kHz ~ 30 kHz のスペクトルを拡大すると図 2.5 となる。

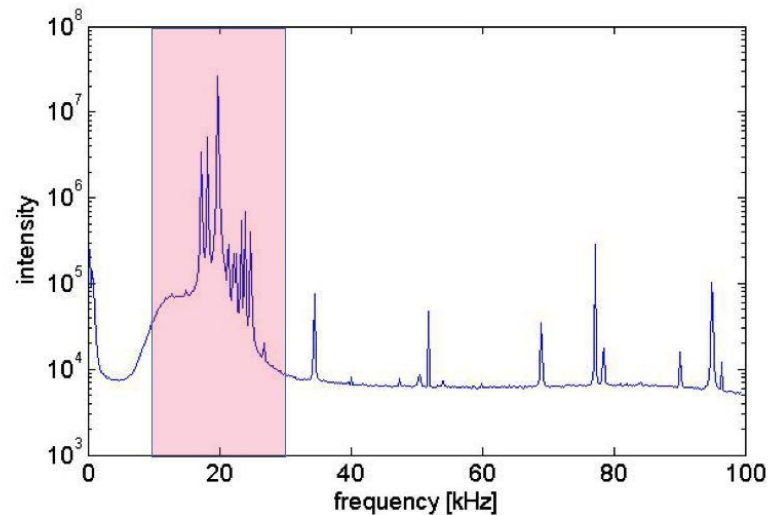


図 2.4 2008 年 6 月 18 日 12 時のスペクトル

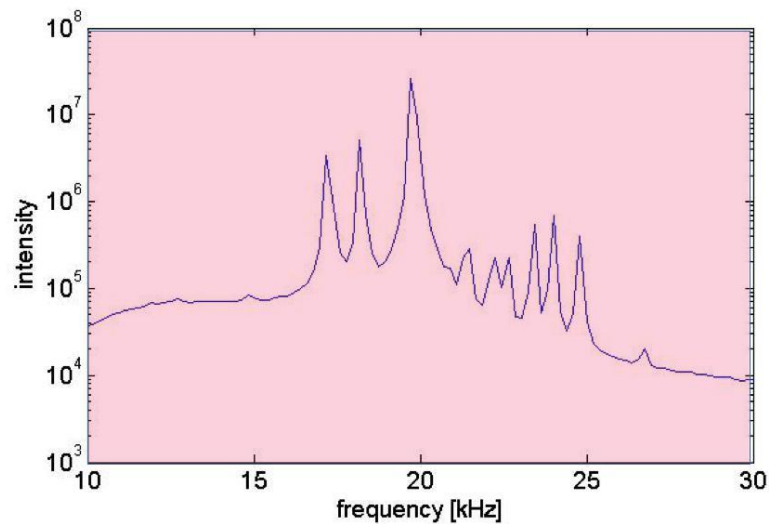


図 2.5 2008 年 6 月 18 日 12 時の周波数スペクトル(10 kHz ~ 30 kHz 拡大)



25 kHz 以下のスペクトルについてピークとその周波数を列挙する。例として図 2.6 に 6 月 18 日の 6 時、12 時、18 時のスペクトルを示す。また図中にはピークの位置とその周波数を記している。この周波数から該当する VLF 帯電波送信局を推定すると表 2.2 のようになる。周波数分解能がおよそ 0.195 kHz のため、周波数が一致しない場合も近い送信局を挙げている。これらの送信局はピークとして観測された、受信できる可能性がある送信局であり、受信の安定性等を調べていく。

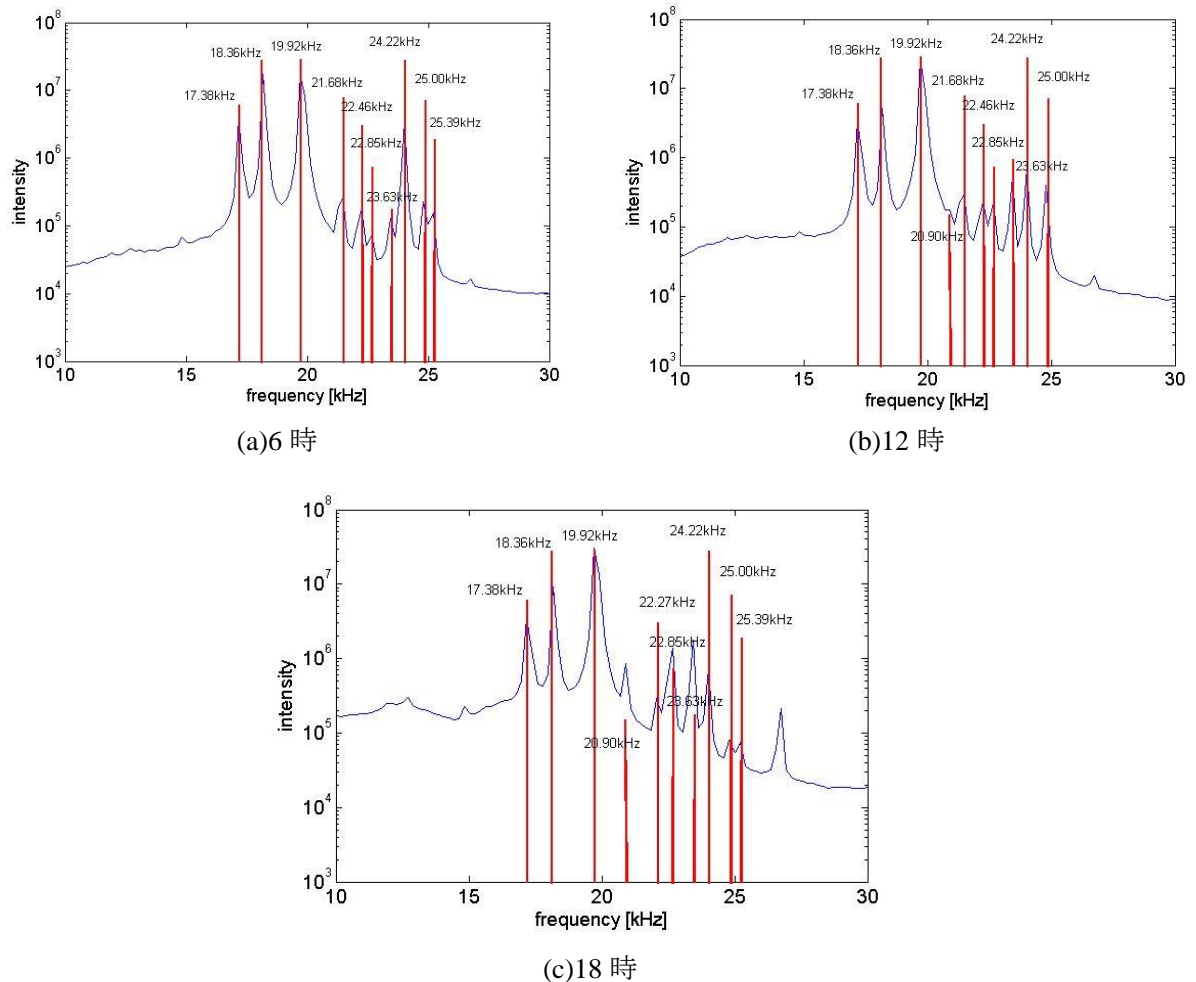


図 2.6 2008 年 6 月 18 日のスペクトルとピークの周波数

表 2.2 図 2.6 中ピークの周波数と該当する送信局

|               |       |       |       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ピークの周波数 [kHz] | 18.36 | 19.92 | 20.90 | 21.68 |       | 22.27 |
| 該当する送信局       | VTX3  | NWC   | HWU   | NPM   | HWU   | JJI   |
| 送信局の周波数 [kHz] | 18.2  | 19.8  | 20.9  | 21.4  | 21.75 | 22.2  |

|       |       |       |       |      |      |       |
|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| 22.85 | 23.63 | 24.22 | 25.00 |      |      | 26.95 |
| ×     | DHO38 | NAA   | NLK   | PWB  | NML4 | TBB   |
| -     | 23.4  | 24.0  | 24.8  | 25.0 | 25.2 | 26.7  |

## 2.3 日変化とターミネータ・タイムによる送信局の同定

表 2.2 のピークは、図 2.6 に示した日時に観測できたことを示すに留まるため、これらの周波数の電波が安定して受信できていたのかを調査する。

1 時間あたり 6 点(10 分毎に 1 点)の値を抽出し、2008 年 6 月 18 日 0 時から 24 時までの 1 日間の受信強度変化を描画する。例として NWC に該当していると考えられる 19.92 kHz の日変化を図 2.7 に示す。図中の High と Low はそれぞれ隣接する周波数の日変化である。この周波数では 13 時から 14 時の間等に一時的な落ち込みが見られる他は安定した受信ができている。もう一つ例を図 2.8 に示す。図 2.8 は HWU に該当していると考えられる 20.90 kHz の日変化である。この図からわかるように、短期的な振幅の上昇が数回見られ、安定した受信ができていないと言えない。図 2.6 で観測されたピークは振幅の乱れの 1 部であったと考えられる。

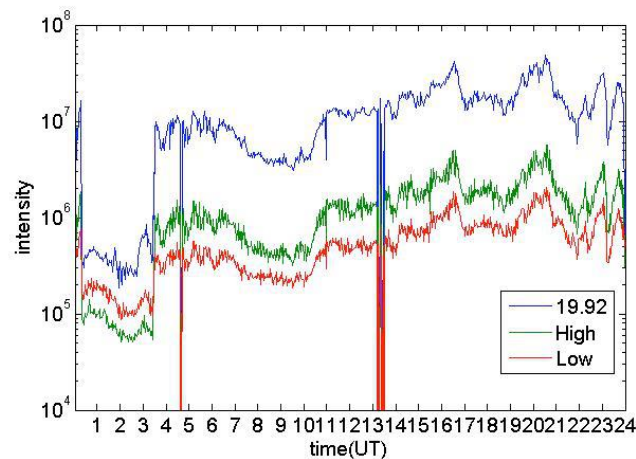


図 2.7 2008 年 6 月 18 日の日変化(19.92 kHz)

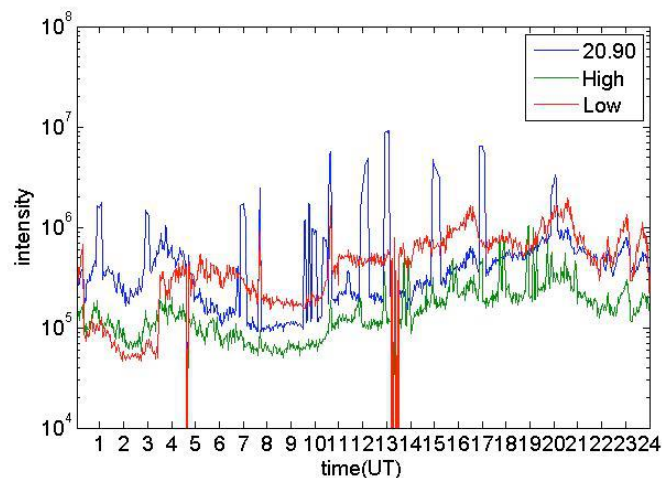


図 2.8 2008 年 6 月 18 日の日変化(20.90 kHz)

次に日変化とターミネータ・タイムによる送信局の同定を行った。図 2.9 に 21.68 kHz の日変化を示す。この図では 2008 年 6 月 18 日と前後 9 日間の中央値と四分位を描画している。図からわかるように、この周波数では安定した振幅を連続して記録しており、電波を受信していることがわかる。しかし、21.68 kHz は NPM と HWU に該当しているため、日変化とターミネータ・タイムを用いて伝搬経路の状態からどちらの送信局から送信された電波なのかを同定する。

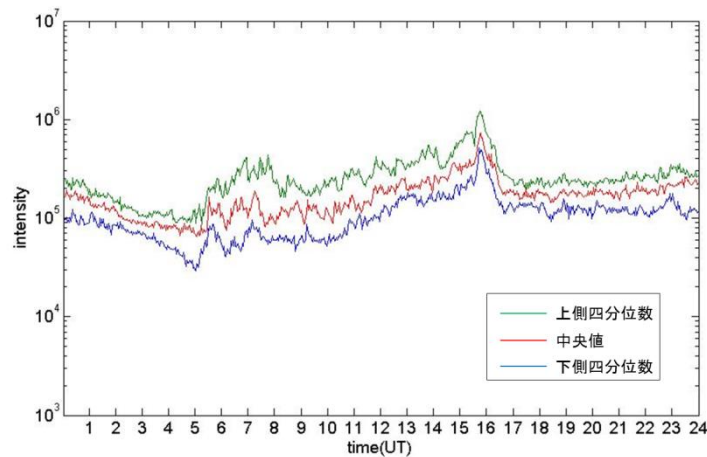


図 2.9 2008 年 06 月 18 日と前後 9 日間の中央値と四分位数の日変化 (21.68 kHz)

図 2.9 では明確な振幅の落ち込みは見られないが、中央値と四分位値の乱れからおよそ 5 時と 16 時付近に日の出、日没があったと考えられ、この付近をターミネータ・タイムと考える。また、1.3.2 項で示したように、昼間の方が夜間と比較して安定した受信ができることを考慮すると、図 2.10 のようになる。ここで、NPM が設置されているアメリカ・ハワイの、このデータが観測された 2008 年 6 月 18 日前後の日の出時刻と日没時刻を調べた結果<sup>(6)</sup>、世界時で日の出が 5 時 15 分前後、日没が 15 時 50 分前後であった。これは図 2.10 の昼間と夜間の推定と一致する。一方、HWU が設置されているフランスの日の出時刻と日没時刻は、世界時で日の出が 4 時 00 分前後、日没が 19 時 50 分前後となり、図で示した昼間と夜間の推定と矛盾する。さらに、ターミネータ・タイムと日の出時刻、日没時刻の差が大きい。以上のことから、観測された 21.68 kHz の電波は NPM の送信電波であると同定する。

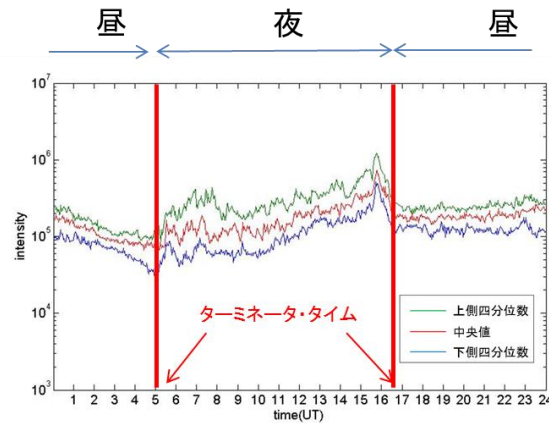


図 2.10 2008 年 06 月 18 日と前後 9 日間の中央値と四分位数の日変化とターミネータ・タイム (21.68 kHz)

別の例として 24.22 kHz の日変化を図 2.11 に示す。この図においても 2008 年 6 月 18 日と前後 9 日間の中央値と四分位を描画している。この周波数では 10 時付近と 23 時付近に明確な振幅の落ち込みが見られるため、この付近をターミネータ・タイムと考える。

この周波数が該当する NAA が設置されているアメリカ・メイン州の、観測期間の日の出時刻と日没時刻は、世界時で日の出時刻が 8 時 45 分、日没時刻が 0 時 15 分であった<sup>(6)</sup>。これらの時刻は図より推定したターミネータ・タイムと良い一致を示しており、また日の出と日没の時刻より夜間だと考えられる時間に中央値と四分位の差がわずかに増加している。以上のことから観測された 24.22 kHz の電波が NAA の送信電波であると同定する。

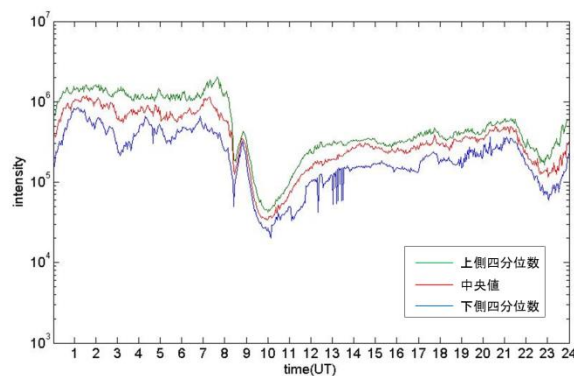


図 2.11 2008 年 06 月 18 日と前後 9 日間の中央値と四分位数の日変化 (24.22 kHz)

## 2.4 同定の結果

以上のプロセスにより 2008 年に観測したデータを解析した結果、南極のオングル島で受信できる可能性があると同定できた送信局は表 2.3 のようになる。特に、VTX3、NWC、NPM、DHO38、NAA はピークの大きさや日変化の傾向から、受信できる可能性が非常に大きいことがわかった。これらの送信局と観測地点を、昭和基地を中心とした正距方位図に示すと図 2.12 のようになる。また、図 2.12 には世界三大雷発生地域も示している。その内、アフリカは十分に伝搬経路に含み、東南アジア、アメリカの一部も伝搬経路に含むことができたことがわかった。

表 2.3 2008 年のデータ解析によりオングル島で受信できる可能性がある送信局

| 送信局   | 周波数 [kHz] | 位置          | 備考     |
|-------|-----------|-------------|--------|
| VTX3  | 18.2      | N 08, E 077 | 可能性が高い |
| NWC   | 19.8      | S 21, E 114 | 可能性が高い |
| NPM   | 21.4      | N 21, W 158 | 可能性が高い |
| JJI   | 22.2      | N 32, E 130 |        |
| DHO38 | 23.4      | N 53, E 007 | 可能性が高い |
| NAA   | 24.0      | N 44, W 067 | 可能性が高い |
| NLK   | 24.8      | N 48, W 122 |        |

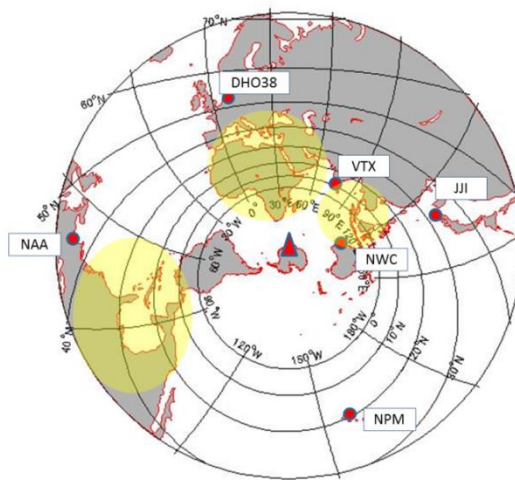


図 2.12 オングル島と受信できる可能性がある送信局の位置および三大雷発生地域

## 2.5 2008 年のデータ解析の問題点

2008 年のデータを解析し表 2.3 に示す送信局の同定を行うことができたが、課題がある。第一に周波数分解能がおよそ 0.195 kHz であることだ。VLF 帯電波送信局のが使用する周波数の多くは 0.1 kHz 間隔であるため、0.1 kHz 間隔で隣接する周波数を使用する送信局の性格な判断が難しい。1 回の解析に使用できるポイント数の上限が 1024 点であるため、これ以上細かい周波数分解能を求めることができない。

第二に使用したアンテナが 1 基であり水平磁界 1 成分しか観測できていないことだ。1.3.3 項で示したようにアンテナがループアンテナであるため指向性があり全く受信できない方角が存在する。また、受信できても受信感度が悪い方角の場合安定した受信の障害となる可能性がある。

これらの問題を解決し、またより精細に南極オングル島の受信環境を調べるために第 55 次南極隊、および第 56 次南極隊の協力の下、改めて観測を行ったので、次章で扱う。

## 第 3 章 2014 年のデータ解析

### 3.1 2014 年のデータについて

2.5 節で述べた 2008 年の観測データの課題点を解決し、より詳細に観測環境のデータを解析するために第 54 次南極隊および第 55 次南極隊により新たに観測を行った。表 3.1 にデータ諸元を示す。観測場所は南極東オングル島にある昭和基地から徒歩 1 時間程度離れた西オングル島である。西オングル島は、昭和基地からの電磁ノイズが多いと考えられる東オングル島より電磁ノイズが少なく観測環境が良いと考えられている。

アンテナの高さはおよそ 10m であり、東西ループ、南北ループのクロスループアンテナを設置し、南北成分および東西成分の水平磁界を観測している。設置の方向は磁北を基準(地理的な北から西へおよそ  $50^\circ$ )としている。観測に使用するロガーは 100 kHz サンプリングに対応しているが、2 成分観測するため 50 kHz サンプリングとして使用する。これにより解析可能な周波数の上限が 25 kHz となるが、観測の対象とする VLF 帯電波の観測は可能である。

0.1 秒毎に 90 ~ 92 回連続してデータを取るため、1 回の観測は毎分 1 分間のうち 10 秒から 20 秒弱までの 9 秒間となる。データ保存用の USB の要領は 128GB であり、22 日間分の観測データを保存できる計画であったが、ロガーのファイルシステム対応の関係により 1 日 ~ 2 日間分の観測のみ保存されていた。

表 3.1 2014 年のデータ諸元

|               |   |
|---------------|---|
| 観測場所          | 南極西オングル島  |
| 観測期間          | 2014 年 1 月および 2014 年 4 月<br>解析使用分: 1 月 10 日 20 時 ~ 11 日 6 時<br>1 月 11 日 16 時 ~ 11 日 23 時<br>4 月 4 日 8 時 ~ 4 月 5 日 3 時 |
| サンプリング周波数     | 50 kHz  |
| 1 観測あたりのポイント数 | 450000 点程度  |
| 周波数分解能        | 0.111 Hz  |
| 解析可能な周波数範囲    | 0 ~ 25 kHz  |
| 使用したアンテナ      | クロスループアンテナ(直交したループアンテナ 2 基)   |
| 観測成分          | 水平磁界東西方向および南北方向 2 成分  |

## 3.2 解析の流れ

図 3.1 に解析の流れを示す。2014 年のデータは 9 秒間連続した観測を行えたことから、1 観測あたりのポイント数が 450000 点となったため、周波数分解能は最高 0.111 Hz 程度まで高めることが可能である。しかし、対象とする VLF 帯電波送信局が使用する周波数の間隔が主に 0.1 kHz であることが多いため、周波数間隔の調整を行う。最低 0.1 kHz 間隔を確保するとして、図 3.2 に示すように周波数間隔を 0.1 kHz、0.05 kHz、0.025 kHz としてピーク値の変化を調べた。その結果、0.1 kHz 間隔では中心となる周波数の  $\pm 0.1$  kHz の値がやや大きくなることがわかった。また、送信局の一部に 0.05 kHz 間隔の周波数を使用するものがあり、その場合図 3.2 (b)のようにピークの周波数を決定できない。一方、0.05 kHz 間隔と 0.025 kHz 間隔では、0.1 kHz 間隔と 0.05 kHz 間隔ほどピークの  $\pm 0.1$  kHz の値が大きくない。また 0.025 kHz 間隔ではポイント数が多くなりデータが大きくなる。

以上より、周波数間隔を 0.05 kHz 間隔となるように 1000 点毎に FFT 処理を行う。FFT 処理を行った周波数スペクトルが 1 分毎に 400 個作成されることになる。400 個の周波数スペクトルを使用し、周波数ごとにフィルタリングを行い、その代表値を並べて 1 個の周波数スペクトルを得る。

観測データを取得できている期間で、1 分毎に得られた周波数スペクトルから周波数ごとの振幅時間変化を求め日変化を調べる。周波数スペクトルと日変化、ターミネータ・タイムから送信局の同定を行う。また、2014 年の観測では直交 2 成分のデータがあるため、東西方向アンテナの受信レベルと南北方向アンテナの受信振幅の比より電波の到来角度を求めることで送信局の同定を行う。

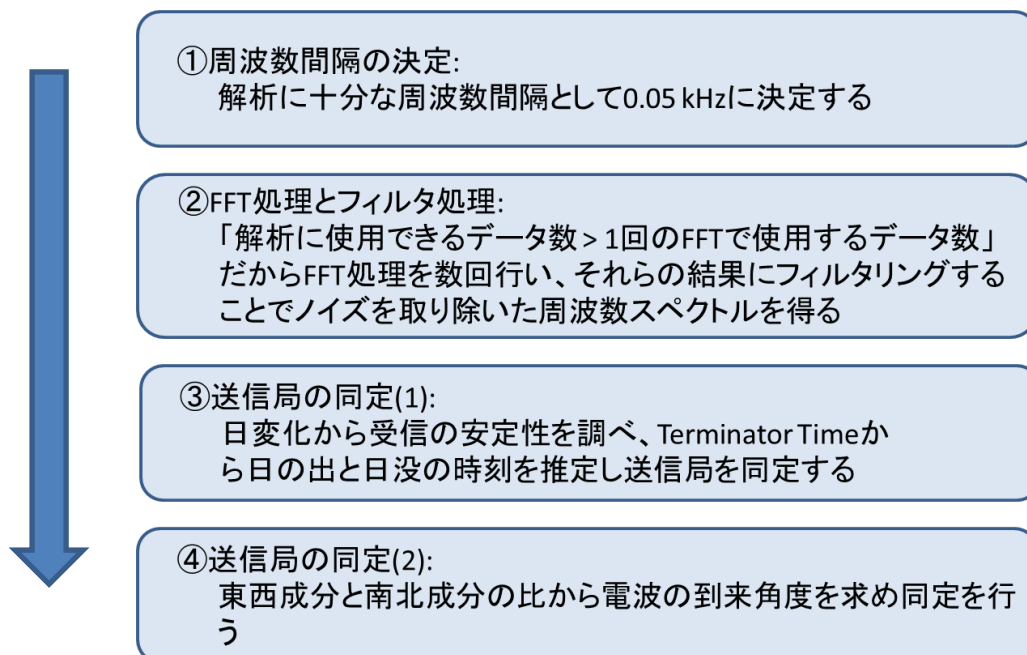


図 3.1 2014 年のデータの解析の流れ



表 3.2 周波数間隔を 0.1 kHz、0.05 kHz、0.025 kHz としたときのピーク値の変化

(a) 19.8 kHz

| 周波数    | 間隔100 | 間隔50 | 間隔25 |
|--------|-------|------|------|
| 19.600 | 1.86  | 2.03 | 2.14 |
| 19.625 |       |      | 1.75 |
| 19.650 |       | 1.20 | 1.06 |
| 19.675 |       |      | 0.73 |
| 19.700 | 1.58  | 1.24 | 1.04 |
| 19.725 |       |      | 2.28 |
| 19.750 |       | 3.75 | 3.91 |
| 19.775 |       |      | 5.49 |
| 19.800 | 4.94  | 5.73 | 6.44 |
| 19.825 |       |      | 5.21 |
| 19.850 |       | 3.80 | 3.59 |
| 19.875 |       |      | 2.36 |
| 19.900 | 1.45  | 1.23 | 1.20 |
| 19.925 |       |      | 0.39 |
| 19.950 |       | 0.35 | 0.25 |

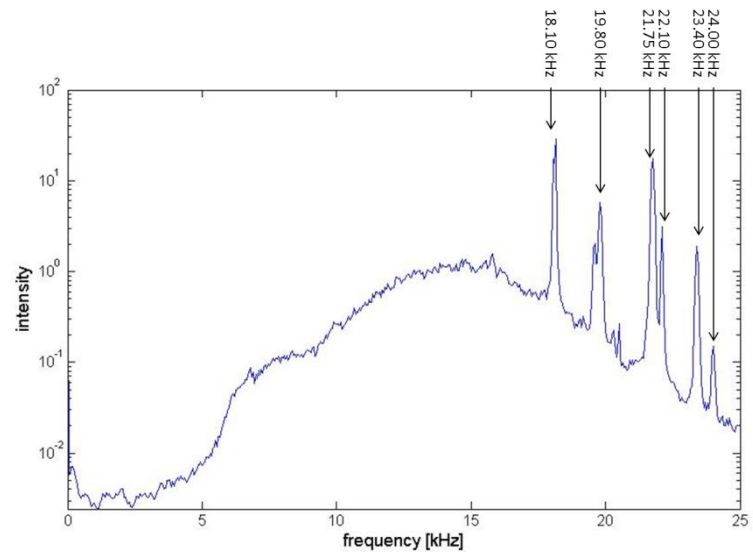
(b) 21.75 kHz

| 周波数    | 間隔100 | 間隔50  | 間隔25  |
|--------|-------|-------|-------|
| 21.500 | 0.36  | 0.20  | 0.13  |
| 21.525 |       |       | 0.17  |
| 21.550 |       | 0.34  | 0.26  |
| 21.575 |       |       | 0.27  |
| 21.600 | 1.01  | 0.50  | 0.29  |
| 21.625 |       |       | 0.87  |
| 21.650 |       | 3.20  | 2.96  |
| 21.675 |       |       | 6.60  |
| 21.700 | 10.86 | 12.65 | 14.36 |
| 21.725 |       |       | 15.20 |
| 21.750 |       | 17.56 | 18.60 |
| 21.775 |       |       | 17.59 |
| 21.800 | 10.99 | 11.06 | 11.43 |
| 21.825 |       |       | 6.55  |
| 21.850 |       | 3.02  | 2.54  |
| 21.875 |       |       | 0.70  |
| 21.900 | 0.90  | 0.46  | 0.27  |

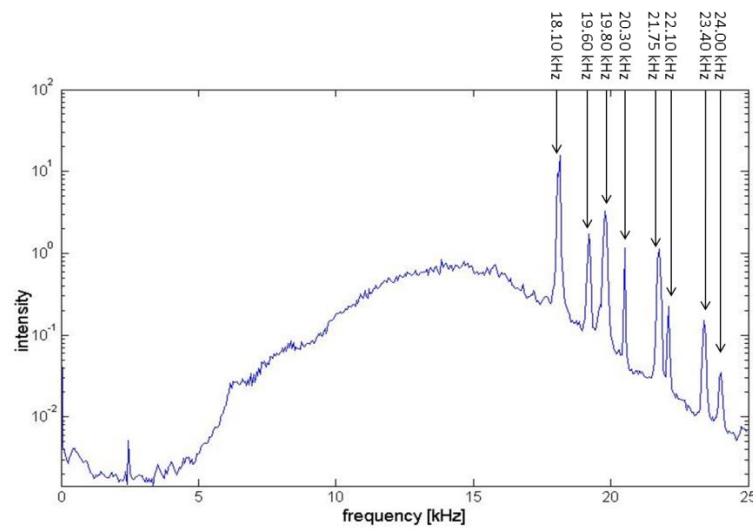
(c) 22.1 kHz

| 周波数    | 間隔100 | 間隔50 | 間隔25 |
|--------|-------|------|------|
| 22.000 | 0.44  | 0.26 | 0.17 |
| 22.025 |       |      | 0.20 |
| 22.050 |       | 1.01 | 0.78 |
| 22.075 |       |      | 2.93 |
| 22.100 | 2.28  | 3.11 | 3.48 |
| 22.125 |       |      | 2.17 |
| 22.150 |       | 0.86 | 0.67 |
| 22.175 |       |      | 0.14 |
| 22.200 | 0.25  | 0.16 | 0.09 |

図 3.2 に 2014 年 1 月 11 日 23 時 0 分のフィルタ処理済みの周波数スペクトルを示す。図には目視で確認できるピークの周波数を記載している。それらの周波数を使用している送信局は表 3.3 のようになる。特に、HWU と考えられる 21.75 kHz を良い状態で受信できていることがわかる。



(a) 南北成分



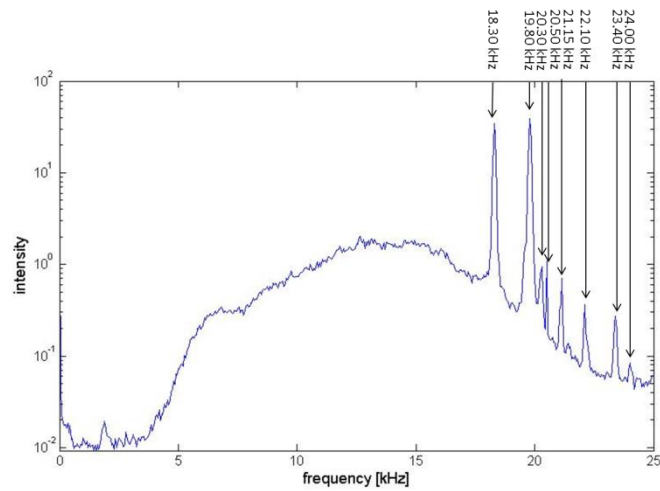
(b) 東西成分

図 3.2 2014 年 1 月 11 日 23 時 0 分の周波数スペクトル

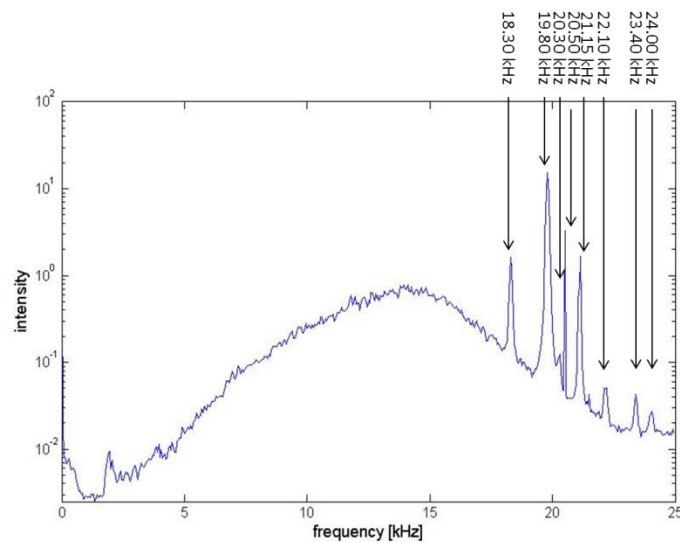
表 3.3 図 3.2 中ピークの周波数と該当する送信局

|               |       |       |       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ピークの周波数 [kHz] | 18.10 | 19.80 | 21.75 | 22.10 | 23.40 | 24.00 |
| ピークの大きさ       | 15.52 | 5.73  | 17.56 | 3.11  | 1.88  | 0.15  |
| 該当する送信局       | RDL   | NWC   | HWU   | GQD   | DHO38 | NAA   |
| 送信局の周波数 [kHz] | 18.10 | 19.80 | 21.75 | 22.1  | 23.40 | 24.00 |

図 3.3 に 2014 年 4 月 4 日 19 時 0 分のフィルタ処理済みの周波数スペクトルを示す。図には目視で確認できるピークの周波数を記載している。それらの周波数を使用している送信局は表 3.4 のようになる。特に、HWU と考えられる 21.75 kHz を良い状態で受信できていることがわかる。



(a) 南北成分



(b) 東西成分

図 3.3 2014 年 4 月 4 日 19 時 0 分の周波数スペクトル

表 3.4 図 3.3 中ピークの周波数と該当する送信局

|               |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ピークの周波数 [kHz] | 18.30 | 19.80 | 20.30 | 21.15 | 22.10 | 23.40 | 24.00 |
| ピークの大きさ       | 34.83 | 39.20 | 0.94  | 0.71  | 0.36  | 0.27  | 0.08  |
| 該当する送信局       | HWU   | NWC   | ICV   | RDL   | GQD   | DHO38 | NAA   |
| 送信局の周波数 [kHz] | 18.30 | 19.80 | 20.27 | 21.1  | 22.1  | 23.4  | 24.00 |

### 3.3 日変化の作成

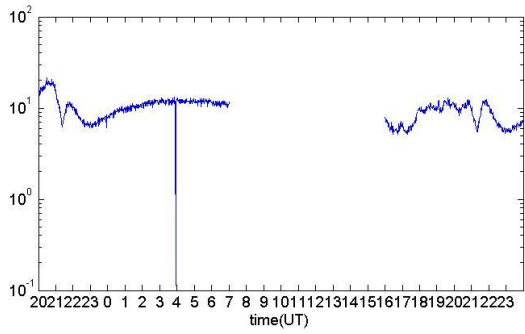
図 3.2 と図 3.3 で示したピークの他に受信できている周波数について調べるため、表 3.5 に示す VLF 帯送信局が使用する 25 kHz 以下の周波数について日変化を作成した。

表 3.5 日変化を作成した周波数

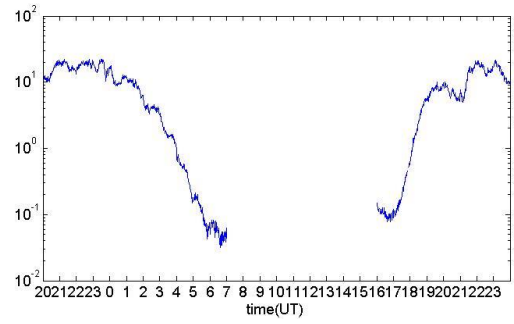
| 送信局  | 周波数 [kHz] | 送信局   | 周波数 [kHz] |
|------|-----------|-------|-----------|
| HWU  | 15.1      | NWC   | 19.8      |
| RUS  | 15.6      | JJI   | 20.2      |
| VTX1 | 16.3      | ICV   | 20.27     |
| JXN  | 16.4      | RJH   | 20.5      |
| NOR  | 16.4      | FTA   | 20.9      |
| FTA  | 16.8      | NPM   | 21.4      |
| SAQ  | 17.2      | HWU   | 21.75     |
| RDL  | 18.1      | GQD   | 22.1      |
| VTX3 | 18.2      | JJI   | 22.2      |
| HWU  | 18.3      | HWU   | 22.6      |
| VTX4 | 19.2      | DHO38 | 23.4      |
| GBZ  | 19.58     | NAA   | 24.0      |
| GQD  | 19.6      | NLK   | 24.8      |

日変化を作成した結果、明らかにノイズレベルと異なる変化を示したり、振幅が安定している等から電波を受信していると考えられる周波数は、1 月分のデータでは 19.6 kHz、19.8 kHz、20.3 kHz、21.75 kHz、22.1 kHz、23.4 kHz、24.0 kHz となった。4 月分のデータでは 18.3 kHz、19.8 kHz、20.3 kHz、21.4 kHz (16 時から 17 時のみ)、22.1 kHz、23.4 kHz、24.0 kHz となった。図 3.4、図 3.5 に受信できていると考えられる周波数の日変化の例を示す。18.1 kHz (RDL)や 20.5 kHz (RJH)のロシアが運用する周波数については各図(d)のように特徴的な日変化を示した。これらは電離層擾乱の観測に使用できるか不明だが受信できている可能性が高い。

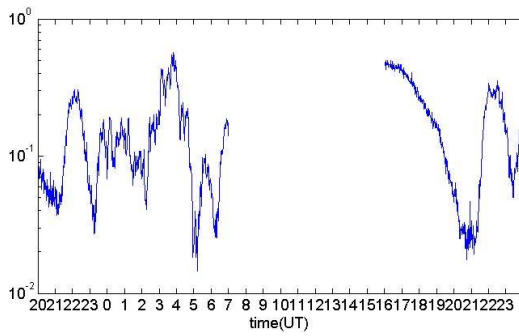
また、これらの周波数を使用する送信局を表 3.6 に示す。表中の×はピークとして観測されなかったことを意味する。また、値は南北成分である。



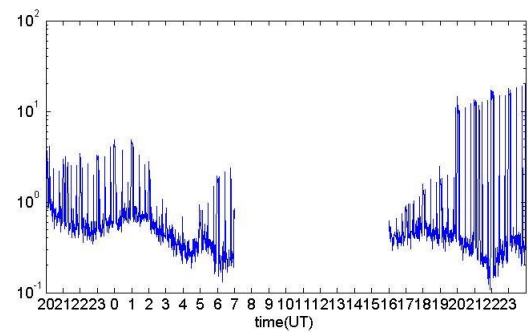
(a) 19.80 kHz



(b) 21.75 kHz

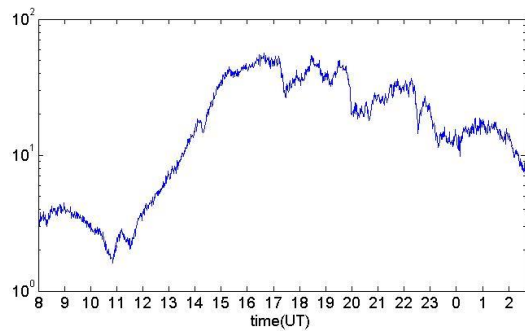


(c) 24.00 kHz

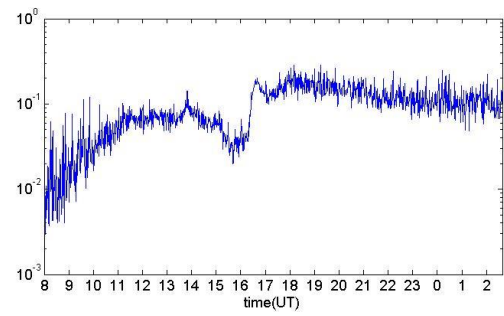


(d) 18.10 kHz

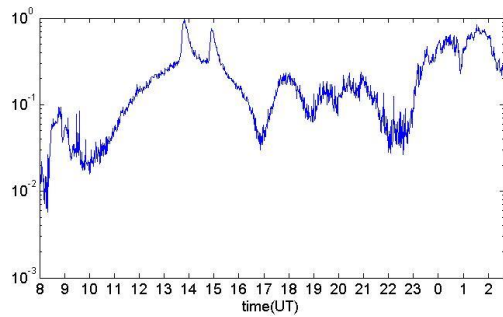
図 3.4 2014 年 1 月 10 日 20 時から翌日にかけての日変化



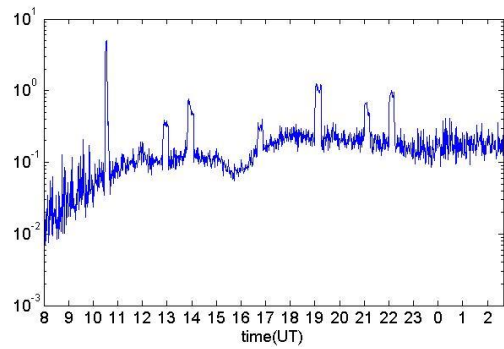
(a) 19.80 kHz



(b) 21.40 kHz



(c) 24.00 kHz



(d) 20.50 kHz

図 3.5 2014 年 4 月 4 日 8 時から翌日 3 時にかけての日変化

表 3.6 日変化を作成した結果受信できていると考えられる周波数

|                        |       |       |       |       |                     |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|
| ピークの周波数 [kHz]          | 18.30 | 19.60 | 19.80 | 20.30 | 21.40               |
| 該当する送信局                | HWU   | GQD   | NWC   | ICV   | NPM                 |
| 送信局の周波数 [kHz]          | 18.30 | 19.60 | 19.80 | 20.27 | 21.40               |
| 1 月 11 日 23 時 0 分のピーク値 | ×     | 2.03  | 5.73  | 0.23  | ×                   |
| 4 月 4 日 19 時 0 分のピーク値  | 34.83 | ×     | 39.20 | 0.94  | 0.20 <sup>(※)</sup> |

|       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|
| 21.75 | 22.10 | 23.40 | 24.00 |
| HWU   | GQD   | DHO38 | NAA   |
| 21.75 | 22.10 | 23.40 | 24.00 |
| 17.56 | 3.11  | 1.88  | 0.15  |
| ×     | 0.36  | 0.27  | 0.08  |

(※)4 月 4 日 17 時の値

### 3.4 ターミネータ・タイムによる送信局の同定

作成した日変化と各送信局が設置してある地点の日の出、日没時刻を用いて<sup>(6)</sup>送信局の同定を試みた。1 月分のデータについては、観測期間は 1 日分あるが欠測により日の出、日没の時刻どちらか、またはどちらもデータが無く、4 月分のデータについては丸 1 日分のデータが無い。このため、日の出、日没時刻の振幅の変化がわからず正確な同定はできなかった。

図 3.6 に 1 月 10 日の 20 時から観測した 19.8 kHz の電波の日変化を示す。この周波数を使用する NWC があるオーストラリア・西オーストラリア州現地の当日の日の出時刻は 21 時 50 分前後、日没時刻は 11 時 11 分であるから図中で示した時刻に日の出、日没を迎えている。欠測により日没の時刻のデータが無いが、日の出時刻については 2 回とも明確な振幅の落ち込みを観測しておりターミネータ・タイムの挙動を示しているといえる。

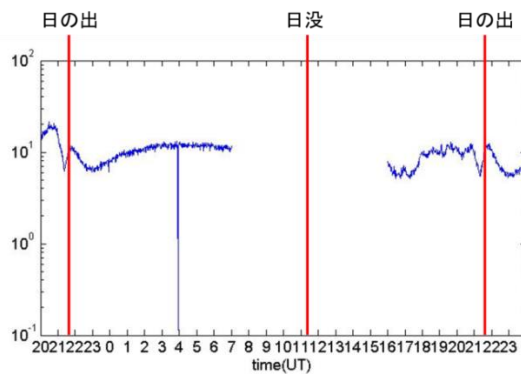


図 3.6 2014 年 1 月 10 日から 11 日にかけての日変化と日の出・日没時刻 (19.80 kHz)

図 3.7 に 1 月 10 日の 20 時から観測した 24.0 kHz の電波の日変化を示す。この周波数を使用する NAA が設置されているアメリカ・メイン州の当日の日の出時刻は 12 時 5 分前後、日没時刻は 21 時 9 分前後であるから図中で示した時刻に日の出、日没を迎えている。欠測により日の出時刻のデータが無いが、日没時刻については振幅の落ち込みを観測しておりターミネータ・タイムの挙動を示しているといえる。また日の出時刻を境にして振幅の変動が異なり、夜間だと考えられる日の出時刻前において不安定な変化を示し、昼間だと考えられる日の出時刻後は落ち着いた変化を示していることから、日変化の挙動としても日の出、日没時刻と対応していると考えられる。

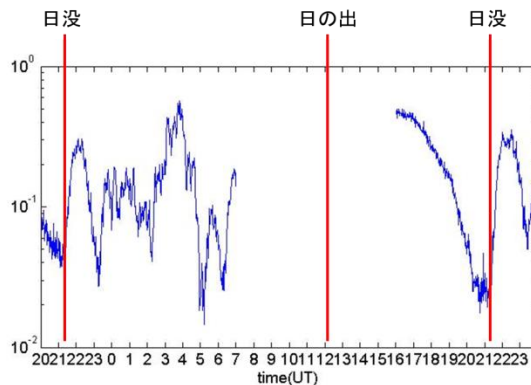


図 3.7 2014 年 1 月 10 日から 11 日にかけての日変化と日の出・日没時刻 (24.00 kHz)

図 3.8 に 1 月 10 日の 20 時から観測した 21.75 kHz の電波の日変化を示す。この周波数を使用する HWU が設置されているフランス現地の当日の日の出時刻は 7 時 38 分前後、日没時刻は 16 時 28 分前後であるから図中で示した時刻に日の出、日没を迎えている。欠測により日の出時刻と日没時刻の振幅変化が不明だが、日の出前に振幅の落ち込みがあり、日没後に振幅の増加が見られることから、これらの時刻に振幅が落ち込んだと考えられる。これはターミネータ・タイム前後の挙動である。

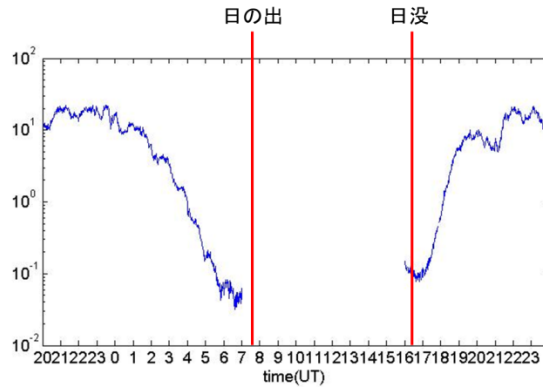


図 3.8 2014 年 1 月 10 日から 11 日にかけての日変化と日の出・日没時刻 (21.75 kHz)

図 3.9 に 4 月 4 日の 8 時から観測した 24.0 kHz の電波の日変化を示す。この周波数を使用する NAA が設置されているアメリカ・メイン州の当日の日の出時刻は 10 時 4 分前後、日没時刻は 23 時 0 分前後であるから図中で示した時刻に日の出、日没を迎えている。図よりどちらの時刻においても振幅が落ち込んでいることがわかるが、その他の時刻においても数回の振幅の落ち込みを記録している。

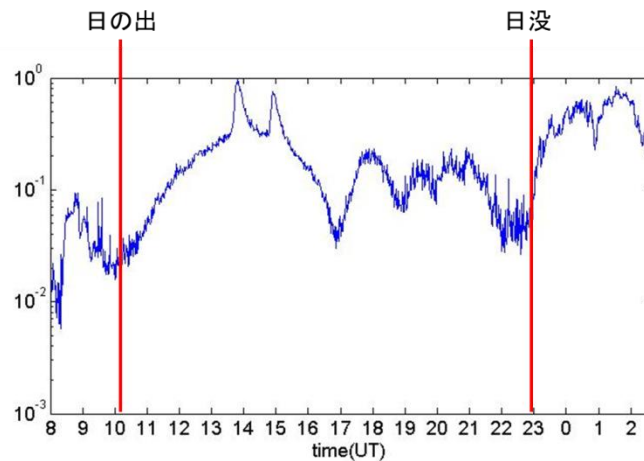


図 3.9 2014 年 4 月 4 日から 5 日にかけての日変化と日の出・日没時刻 (24.00 kHz)



図 3.10 に 4 月 4 日の 8 時から観測した 19.8 kHz の電波の日変化を示す。この周波数を使用する NWC があるオーストラリア・西オーストラリア州現地の当日の日の出時刻は 22 時 32 分前後、日没時刻は 10 時 21 分前後であるから図中で示した時刻に日の出、日没を迎えている。どちらの時刻においても大きさは小さいが振幅の落ち込みが見られる。

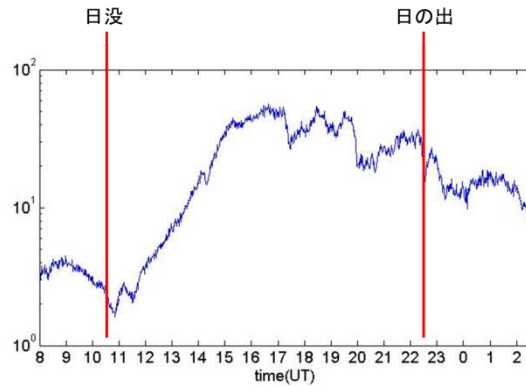


図 3.10 2014 年 4 月 4 日から 5 日にかけての日変化と日の出・日没時刻 (19.80 kHz)

図 3.11 に 4 月 4 日の 8 時から観測した 18.3 kHz の電波の日変化を示す。この周波数を使用する HWU が設置されているフランス現地の当日の日の出時刻は 5 時 29 分前後だから観測期間に日の出時刻が含まれていない。日没時刻は 18 時 28 分前後であるから図中で示した時刻に日没を迎えている。図からわかるように振幅の落ち込みは 16 時前後に迎えており、日没時刻付近ではないという結果となった。

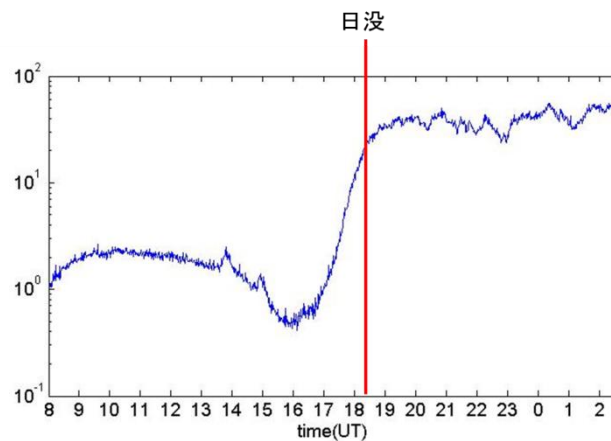


図 3.11 2014 年 4 月 4 日から 5 日にかけての日変化と日の出・日没時刻 (18.30 kHz)

18.3 kHz のピークが隣接する 18.2 kHz のピークの場合、使用する送信局は VTX3 である。VTX3 があるインドの当日の日の出時刻は 0 時 45 分前後、日没時刻は 12 時 59 分だから、図 3.12 のようになる。この場合でも日の出と日没の時刻に振幅の落ち込みは見られず、対応しているとはいえない結果となった。

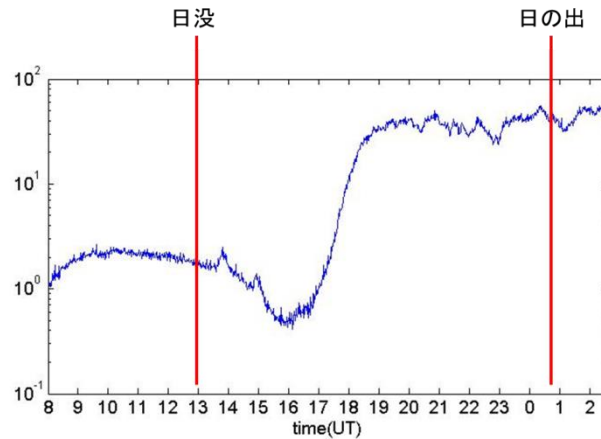


図 3.12 2014 年 4 月 4 日から 5 日にかけての日変化 (18.30 kHz)について  
VTX3 (18.2 kHz)の電波だとした場合の日の出・日没時刻

他の周波数についても日の出と日没の時刻と日変化の対応を調べた結果、表 3.7 のようになった。表中の◎は時刻、前後の日変化ともに良い一致を示したものの、○は振幅の落ち込みを観測したが日変化の対応が良いとは言えないものや、日の出、日没時刻の前後の様子から日変化は対応していると考えられるが、その時刻のデータが欠測等により確認できないもの、×は日の出、日没時刻と振幅が落ち込んだ時刻が対応していないものを示す。

表 3.7 2014 年のデータ解析によりオングル島で受信できる可能性がある送信局

| ピークの周波数 [kHz] | 18.30 | 19.60 | 19.80 | 20.30 | 21.40 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 該当する送信局       | HWU   | GQD   | NWC   | ICV   | NPM   |
| 送信局の周波数 [kHz] | 18.3  | 19.6  | 19.80 | 20.27 | 21.4  |
| 1 月分の日の出時刻の対応 | ピーク無  | ○     | ◎     | ○     | ピーク無  |
| 1 月分の日没時刻の対応  | ピーク無  | ○     | データ無  | ○     | ピーク無  |
| 4 月分の日の出時刻の対応 | データ無  | ピーク無  | ○     | データ無  | ○     |
| 4 月分の日没時刻の対応  | ×     | ピーク無  | ○     | ×     | データ無  |

| 21.75 | 22.10 | 23.40 | 24.00 |
|-------|-------|-------|-------|
| HWU   | GQD   | DHO38 | NAA   |
| 21.75 | 22.1  | 23.40 | 24.00 |
| ○     | ○     | ○     | ◎     |
| ○     | ○     | ○     | ◎     |
| ピーク無  | データ無  | データ無  | ○     |
| ピーク無  | ×     | ×     | ○     |

2014 年のデータについて、日変化とピークの大きさからまとめた表 3.6 と日の出、日没時刻と日変化の対応をまとめた表 3.7 より、受信できている可能性が高いと考えられる送信局を考える。

まず NWC については、表 3.6 からわかるように 1 月、4 月ともにピークとして観測しており、特に 4 月については非常に大きな振幅となっている。また、日の出、日没時刻と日変化の対応も表 3.7 のように良い一致を示している。これらのことから受信できる可能性が非常に高いと考えられる送信局である。同様に NAA についても、ピークの振幅は大きくないが、日の出、日没時刻と日変化の対応や図 3.7 と図 3.9 のように明確に特徴的な日変化を示していることから受信可能だと考えられる。しかし、振幅が小さいため受信できなくなることや、不安定になる可能性はあるといえる。

一方、4 月の観測データにおいて非常に大きなピークとして観測された HWU が使用する 18.3 kHz については日没時刻が明らかに日変化と対応していないことから HWU が送信した電波だとは同定できない。隣接する 18.2 kHz を使用する VTX3 のピークの場合でも図 3.12 のように時刻の対応が見られないため、他の送信局の電波である可能性がある。

NPM については受信できていた時間が 4 月分の 1 時間のみであることから、安定した受信は難しいと考えられるが、電波は届いていると考えられるため受信設備の仕様が変われば受信できる可能性がある。

ヨーロッパ各国の送信局である GQD、ICV、DHO38、HWU (21.75 kHz) は、4 月の日の出、日没時刻と日変化の対応は一致が見られなかったが、1 月については一致が見られたことから、受信できる可能性があるが時期によって受信できなくなると考えられる。その理由としては南極の白夜により伝搬経路の状態が変化した、送信電力が小さいため受信が不安定である、送信局が周波数を切り替え運用を休止したこと等が考えられる。

以上をまとめると表 3.8 のようになる。

表 3.8 2014 年のデータの日変化よりオングル島で受信できる可能性がある送信局

| 送信局   | 周波数 [kHz]  | 位置          | 備考           |
|-------|------------|-------------|--------------|
| GQD   | 19.6, 22.1 | N 54, W 2   | 時期による        |
| NWC   | 19.8       | S 21, E 114 | 良く受信できる      |
| ICV   | 20.27      | N 41, E 9   | 時期による        |
| NPM   | 21.4       | N 21, W 158 | 微弱なため不安定     |
| HWU   | 21.75      | N 46, E 1   | 時期による        |
| DHO38 | 23.4       | N 53, E 007 | 時期による        |
| NAA   | 24.0       | N 44, W 067 | 受信できるが振幅は小さい |

### 3.5 東西成分と南北成分の比による送信局の同定

表 3.8 に示した送信局を観測地点にほど近い南極昭和基地を中心とした正距方位図に示すと図 3.13 のようになる。アンテナの南北方向は磁北を基準とし、地理的な北から西へおよそ  $50^\circ$  の方角に向けているため、図中に示した縦線が観測上の  $0^\circ$  基準となる。また、基準線から東回りを正としたときの各送信局の方角も図中に示している。

直交したクロスループアンテナの指向特性が図 3.14 に示すような理想的なものとなった場合、東西方向のアンテナで受信した振幅と南北方向のアンテナで受信した振幅の比を取り三角関数 ( $\tan^{-1}$  関数)を用いて角度を導出することが可能である。

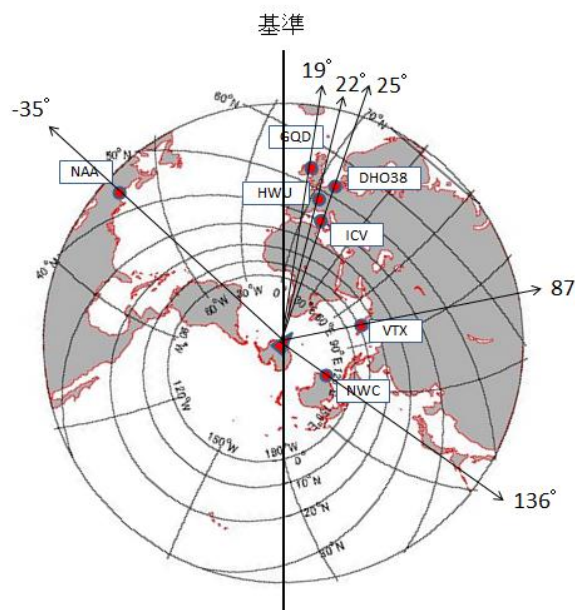


図 3.13 昭和基地中心の正距方位図に示したアンテナの基準方角と送信局の方角

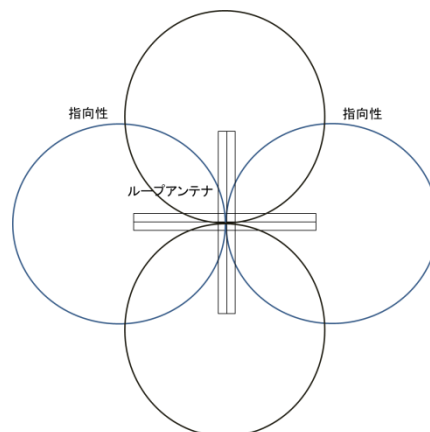


図 3.14 理想的なクロスループアンテナの指向特性

データを観測した期間の東西、南北各成分の1時間あたり6点(各時1分、11分、21分、31分、41分、51分)を抽出し、その平均の比を求める。その値の $\tan^{-1}$ から角度を求め、図3.13に示したアンテナからの角度との差分を計算する。また、受信が安定していれば、抽出した6点の振幅は分散が小さくなるはずだから、安定した受信の目安として標準偏差、最大値と最小値の差も計算した。

観測データがある2014年1月10日20時から1月11日23時のうち欠測期間である1月11日7時から16時までを除いた19時間のなかで、最大値と最小値の差が2以下、標準偏差が1以下、送信局との角度の差が $\pm 3^\circ$ 以内となった回数を数えた結果、表3.9のようになった。また、2014年4月4日8時から4月5日3時までの20時間についても同様に回数を数えた結果、表3.10のようになった。NPMと考えられる21.4 kHzは受信できている時間が短いため除いている。また、4月分の18.3 kHzは日変化による同定ではHWUとの一致が見られなかったが、ここではHWUの電波として考え角度を計算している。

1月分、4月分ともに、最大値と最小値の差や標準偏差が指定値以下となる回数と比較して観測上の送信局の角度と計算による角度の差が指定値以下となる回数が少ない結果となった。角度の誤差は多く $5^\circ$ 以上で $10^\circ$ 以上の誤差もあった。

表 3.9 東西成分と南北成分の比による送信局の同定計算結果(1月分)

| 送信局                 | NWC   | ICV   | HWU   | GQD   |       | DHO38 | NAA   |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 周波数 [kHz]           | 19.80 | 20.30 | 21.75 | 19.60 | 22.10 | 23.40 | 24.00 |
| 最大最小 2 以下 [回]       | 11    | 5     | 14    | 8     | 12    | 13    | 5     |
| 標準偏差 1 以下 [回]       | 11    | 8     | 15    | 9     | 13    | 15    | 8     |
| 角度 $3^\circ$ 以下 [回] | 0     | 4     | 0     | 2     | 2     | 0     | 0     |

表 3.10 東西成分と南北成分の比による送信局の同定計算結果(4月分)

| 送信局                 | HWU   | NWC   | ICV   | GQD   | DHO38 | NAA   |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 周波数 [kHz]           | 18.30 | 19.80 | 20.30 | 22.10 | 23.40 | 24.00 |
| 最大最小 2 以下 [回]       | 17    | 4     | 5     | 1     | 7     | 5     |
| 標準偏差 1 以下 [回]       | 17    | 5     | 9     | 4     | 9     | 5     |
| 角度 $3^\circ$ 以下 [回] | 0     | 0     | 0     | 1     | 2     | 0     |

表3.6からピーク値が大きいことが分かっている1月のHWU(21.75 kHz)や、4月の18.3 kHzの受信が安定していることを最大値と最小値の差や標準偏差が示しているが、それらの周波数においても角度の誤差が大きくなっていることから、誤差が発生する何らかの原因があると考えられる。

考えられる要因の1つは、アンテナの設置角度がずれている場合である。図3.15はアンテナの設置場所付近の写真であるが、土地の凹凸が大きく安定しているとはいえないため、設置時に角度がずれてしまった可能性がある。仮定として、アンテナを南極点に置いた場合で南北の方角を経度 $0^\circ$ 線に沿わせたときにどのような結果となるか計算した。1月分の結果を表3.11に示す。

角度の誤差が $3^{\circ}$ 以下となる回数が大きく増加していることがわかる。4月分についても計算した結果、表 3.12 のようになり、4月分についても顕著に角度の誤差が小さくなっていることがわかる。また、1月分の NWC 19.8 kHz など表中では0回となっている場合でも多くの時間で $4^{\circ}$ から $5^{\circ}$ 程度と小さな差となっていた。

この結果は、アンテナの設置角度がずれることで誤差が大きくなっているという考え方と一致している。

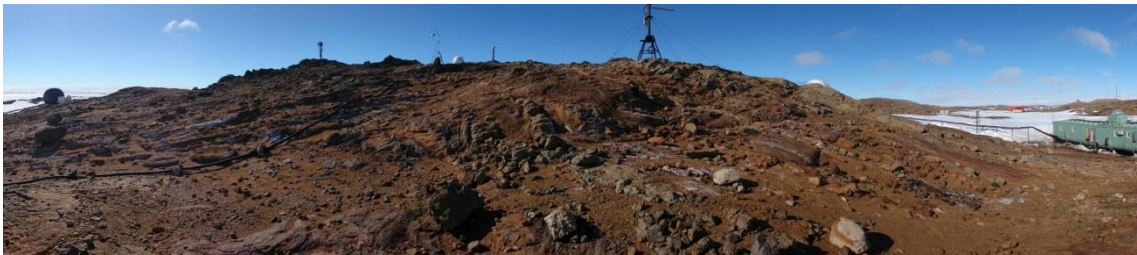


図 3.15 アンテナ設置場所付近の様子

表 3.11 東西成分と南北成分の比による送信局の同定計算結果(1月分)

南北成分のアンテナを経度 $0^{\circ}$ 線に沿わせ南極点に置いたと仮定

| 送信局                   | NWC   | ICV   | HWU   | GQD   |       | DHO38 | NAA   |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 周波数 [kHz]             | 19.80 | 20.30 | 21.75 | 19.60 | 22.10 | 23.40 | 24.00 |
| 最大最小 2 以下 [回]         | 11    | 5     | 14    | 8     | 12    | 13    | 5     |
| 標準偏差 1 以下 [回]         | 11    | 8     | 15    | 9     | 13    | 15    | 8     |
| 角度 $3^{\circ}$ 以下 [回] | 0     | 9     | 4     | 0     | 0     | 14    | 2     |

表 3.12 東西成分と南北成分の比による送信局の同定計算結果(4月分)

南北成分のアンテナを経度 $0^{\circ}$ 線に沿わせ南極点に置いたと仮定

| 送信局                   | HWU   | NWC   | ICV   | GQD   | DHO38 | NAA   |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 周波数 [kHz]             | 18.30 | 19.80 | 20.30 | 22.10 | 23.40 | 24.00 |
| 最大最小 2 以下 [回]         | 17    | 4     | 5     | 1     | 7     | 5     |
| 標準偏差 1 以下 [回]         | 17    | 5     | 9     | 4     | 9     | 5     |
| 角度 $3^{\circ}$ 以下 [回] | 10    | 11    | 18    | 0     | 12    | 0     |

誤差の要因として考えられるものとして2つ目は、東西成分を受信するアンテナと南北成分を受信するアンテナの受信感度に大きな違いがある場合である。角度の計算は観測に使用したクロスループアンテナの指向特性が図 3.14 に示すように理想的であると仮定したものであるから、2つのアンテナの受信感度がそろっていなければ角度の誤差の要因となる。

図 3.16 に 2014 年 1 月 11 日 23 時 0 分に観測した x 成分と y 成分それぞれのスペクトルを示す。ここで x 成分は南北成分を受信するアンテナ、y 成分は東西成分を受信するアンテナを意味する。

スペクトルの中で直流成分に注目すると x 成分は y 成分の 2 倍近くの大きさがあることがわかる。このことから、アンテナの受信特性が一致していないことが考えられる。

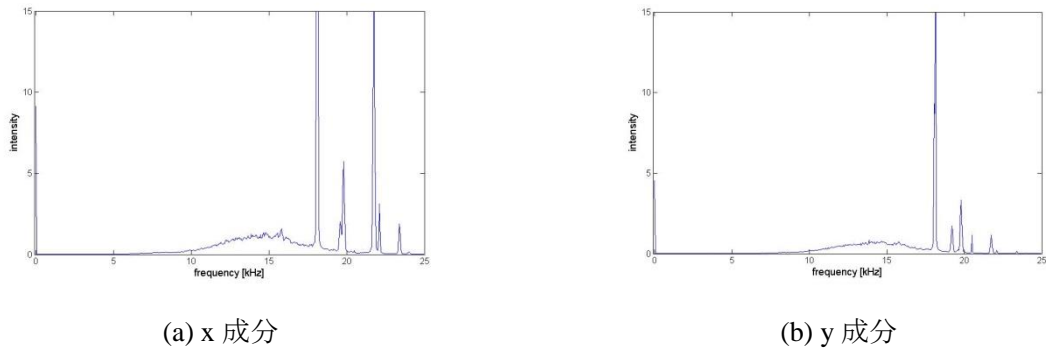


図 3.16 2014 年 1 月 11 日 23 時 0 分のスペクトル

そこで、1 月に観測された送信局の中で、アンテナを南極点に置いたと仮定したときに最も角度の一致が良かった DHO38 に対して、角度の誤差が 0 となるように y 成分を増幅する係数を求め、その係数を他の周波数の y 成分に対しても乗じて計算した。

例として、1 月 10 日 23 時台について、DHO38 の角度である  $22^\circ$  となるように y に乗じる係数の値を求めるとおよそ 4.844 となった。そこで全時間帯の全周波数の y 成分に 4.8 を乗じて改めて角度を計算した結果、表 3.13 のようになった。

NWC では標準偏差等はよい収束を見せているのに対して角度の誤差は改善せず、 $20^\circ$  以上の誤差となった。また、NAA は標準偏差のおさまりは良くないが角度の誤差は小さくなる傾向にあった。一方、HWU については標準偏差や角度の誤差でよい結果を示した。

表 3.13 東西成分と南北成分の比による送信局の同定計算結果(1 月分)  
y 成分に係数を乗じた場合

| 送信局                 | NWC   | ICV   | HWU   | GQD   |       | DHO38 | NAA   |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 周波数 [kHz]           | 19.80 | 20.30 | 21.75 | 19.60 | 22.10 | 23.40 | 24.00 |
| 最大最小 2 以下 [回]       | 14    | 1     | 8     | 1     | 3     | 0     | 0     |
| 標準偏差 1 以下 [回]       | 15    | 1     | 10    | 3     | 5     | 0     | 3     |
| 角度 $3^\circ$ 以下 [回] | 0     | 2     | 5     | 0     | 6     | 8     | 9     |

4 月分についても、アンテナを南極点に置いたと仮定したときに最も角度の一致が良かった DHO38 に対して、角度の誤差が 0 となるように y 成分を増幅する係数を求め、その係数を他の周波数の y 成分に対しても乗じて計算した。南極点に置いたと仮定した場合に良い角度の一致を示した 4 月 4 日 9 時台について、DHO38 の角度である  $22^\circ$  となるように y に乗じる係数の値を求めるとおよそ 3.084 となった。そこで全時間帯の全周波数の y 成分に 3.1 を乗じて改めて角度を計算した結果、表 3.14 のようになった。

HWU、NWC については 1 月分と同じように角度の誤差が改善しないという結果となった。1 月分では角度の誤差の改善が見られた NAA についても誤差が改善せず  $10^{\circ}$  から  $20^{\circ}$  の誤差となった。

1 月分、4 月分ともに改善が見られたアンテナの設置角度がずれている場合の対応と比較して、係数を乗ずるという対応では全体的な改善は見られなかった。

表 3.14 東西成分と南北成分の比による送信局の同定計算結果(4 月分)

y 成分に係数を乗じた場合

| 送信局                   | HWU   | NWC   | ICV   | GQD   | DHO38 | NAA   |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 周波数 [kHz]             | 18.30 | 19.80 | 20.30 | 22.10 | 23.40 | 24.00 |
| 最大最小 2 以下 [回]         | 4     | 4     | 1     | 0     | 0     | 2     |
| 標準偏差 1 以下 [回]         | 6     | 4     | 1     | 0     | 3     | 3     |
| 角度 $3^{\circ}$ 以下 [回] | 0     | 0     | 12    | 2     | 9     | 0     |

以上より、アンテナの設置角度がずれていることが誤差の要因として可能性が高いことがわかった。したがって、表 3.11 と表 3.12 にある送信局については、受信局から送信局までの方角が良い一致を示すことから、その送信局が送信している電波であると同定する。



### 3.6 2014 年のデータの同定結果

4 月分の HWU 18.3 kHz については、日変化では HWU であると同定できなかったが、電波を安定して HWU の方角から受信していることや、ピークも大きいこと、1 日分の完全なデータが無く日変化の把握が不完全であることから、成分比による同定結果を優先し HWU が送信した電波だと考えてよいといえる。

表 3.15 2014 年のデータ解析によりオングル島で受信できる可能性がある送信局

| 送信局   | 周波数 [kHz]   | 位置          | 備考              |
|-------|-------------|-------------|-----------------|
| GQD   | 19.6, 22.1  | N 54, W 2   | 時期による           |
| NWC   | 19.8        | S 21, E 114 | 良く受信できる         |
| ICV   | 20.27       | N 41, E 9   | 時期による           |
| NPM   | 21.4        | N 21, W 158 | 微弱なため不安定        |
| HWU   | 18.3, 21.75 | N 46, E 1   | 時期により周波数が異なるが安定 |
| DHO38 | 23.4        | N 53, E 007 | 時期による           |
| NAA   | 24.0        | N 44, W 067 | 受信できるが振幅は小さい    |

## 第4章 結論と将来の展望

### 4.1 2008年と2014年のデータによる各送信局受信状況

2008年のデータを解析した結果と2014年のデータを解析した結果から受信できる送信局を考察すると、全てのデータで観測され日変化特性や受信角度でよい一致を示したNWC、DHO38、NAAは受信できるだろう。2008年では受信できる可能性が高いという結果となったNPMは2014年のデータでは微弱な受信であったことから、アンテナによっては受信できない可能性があるが電波は伝搬しているため候補として有力である。2008年の同定結果では周波数間隔が粗いことから候補に挙がったVTX3 (18.2 kHz)とJJI (22.2 kHz)は、2014年の同定結果より、それぞれHWU (18.3 kHz)、GQD (22.1 kHz)またはICV (20.27 kHz)であると考えられ、受信できない可能性が高い。HWUは観測時期により周波数が異なるがどちらも受信できる。

以上を表4.1にまとめる。◎は受信できる可能性が非常に大きい、○は受信できると考えられる、△はアンテナの受信特性によっては受信できると考えられる。またこれらの送信局を昭和基地中心の正距方位図にまとめる。世界三大雷地域のうちアフリカは伝搬経路に含めることができ、アメリカはNAAが一部通過している。東南アジアはインドのVTX3、VTX4を受信できていないため観測は難しいことがわかる。またNWCからの電波は雷地域を伝搬していないが、伝搬距離が短いため極地付近の電磁気現象の解析に有効であると考えられる。

表4.1 2008年および2014年の観測データの同定結果

| 送信局               | HWU    | GQD    | NWC   | ICV    | NPM    | HWU    | DHO38  | NAA    |
|-------------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 周波数 [kHz]         | 18.3   | 19.6   | 19.8  | 20.27  | 21.4   | 21.75  | 23.4   | 24.0   |
| 送信局までの<br>距離 [km] | 13,247 | 14,184 | 7,138 | 12,468 | 14,589 | 13,247 | 13,824 | 15,221 |
| 受信状況              | ◎      | ○      | ◎     | ○      | △      | ◎      | ○      | ○      |

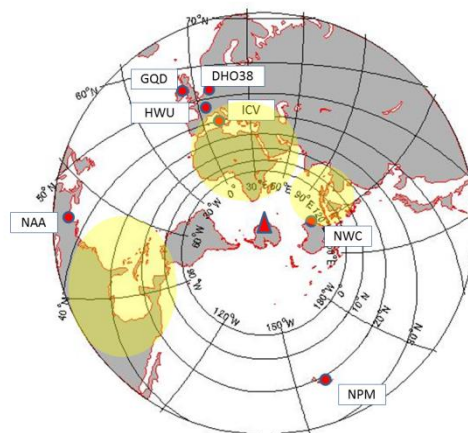


図4.1 2008年および2014年の観測データから同定した送信局と雷地域

## 4.2 将来の展望

第 56 次南極隊の協力の下、南極西オングル島で受信設備の構築を始めている。設置するアンテナの概形を図 4.2 に示す。設置場所は 1 ～ 2m 程度の傾斜となっているが概ね平地であり、電源線から離れた地点である。UPS を備えるため、停電時にも観測を続けることができる。

アンテナの設置角度については、設置場所の傾斜の影響を受けないよう補正して設置する予定である。2014 年の観測では磁北を基準としたループの方角については、引き続き磁北を基準とするのか、経度線に合わせるのか、または受信の効率を高めるために送信局の方角に向けるのかを協議し決定する予定である。

設備が完成次第観測を開始し、雷放電、極域における高エネルギー荷電粒子の降下と下部電離層の関係解明につなげる。

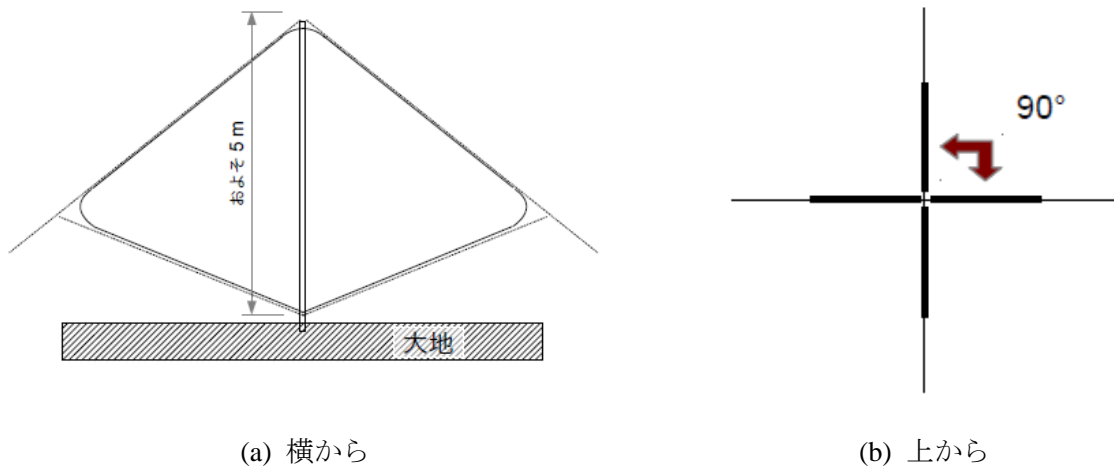


図 4.2 西オングル島に設置するアンテナ概形

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、親身になってご指導して下さいました電気通信大学情報・通信工学専攻芳原容英教授に心から感謝を申し上げます。また、極地研究所の岡田雅樹先生、山岸久雄先生、南極隊の方々にはデータの提供や南極での観測等大変お世話になりました。最後に研究室の皆様には研究だけでなく相談にのっていただき助かりました。本当にありがとうございました。

## 参考文献

- (1) U.S.Inan, S.A.Cummer, R.A.Marshall (2010): “A survey of ELF and VLF research on lightning-ionosphere interactions and causative discharges”, Journal of Geophysical Research Vol.115 A00E36 (2010)
- (2) 早川正士 (2005): “地震に伴う電磁気現象のいろいろ”, 電気通信大学紀要 17 巻 1・2 合併号, pp.1-9 (2005)
- (3) 馬場清英 (1993): “超長波電波の電離層・地表導波管伝搬の研究”, 名古屋工業大学学術機関リポジトリ, pp.14-32 (1993)
- (4) 吉川忠久 (2009): “1・2 陸技受験教室 3 無線工学 B 第 2 版”, 東京電機大学出版局, pp.160-168 (2009)
- (5) 吉田麻里, 山内健, 堀江匠, 早川正士 (2008): “Wave-hop 法を用いた VLF/LF 帯電波伝搬解析による Terminator Time の発生機構に関する考察”, 電子情報通信学会論文誌 B Vol.J91-B No.1, pp.70-78 (2008)
- (6) 日の出、日の入、月の出、月の入、惑星の出没南中  
<http://star.gs/cgi-bin/scripts/hinodet.cgi>, 2014 年 1 月 7 日および 2015 年 1 月 22 日閲覧
- (7) R.H.W.Friedel, A.R.W.Hughes (1990): “Characteristics and frequency of occurrence of Trimpi events recorded during 1982 at Sanae, Antarctica”, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Vol.52, No.5, pp.329-339 (1990)
- (8) A.J.Smith, P.D.Cotton (1990): “The Trimpi effect in Antarctica: observations and models”, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Vol.52, No.5, pp.341-355 (1990)
- (9) R.L.Dowden, C.D.D.Adams (1990): “Lightning-induced perturbations on VLF subionospheric transmissions”, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Vol.52, No.5, pp.357-363 (1990)
- (10) T.D.G.Clark, A.J.Smith (1990): “Quasi-periodic particle precipitation and Trimpi activity at Halley, Antarctica”, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Vol.52, No.5, pp.365-375 (1990)
- (11) A.L.Vampola (1990): “In-situ observations of magnetospheric electron scattering by a VLF transmitter”, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Vol.52, No.5, pp.377-384 (1990)
- (12) T.Ondoh (1990): “Broad-band auroral VLF hiss and inverted-V electron precipitation in the polar magnetosphere”, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Vol.52, No.5, pp.385-397 (1990)
- (13) Y.D.Hu, B.J.Fraser (1990): “The effects of a cold ion parallel beam on electromagnetic waves with frequency near an ion gyrofrequency during plasmaspheric refilling”, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Vol.52, No.5, pp.399-408 (1990)
- (14) 満保正喜 (1992): “VLF 波垂直偏波受信による下部電離層電子密度推定のシミュレーション”, T.IEE Japan, Vol.112-C, No.12 (1992)
- (15) Y.Reuveni, C.Price, Y.Yair, R.Yaniv (2011): “The connection between meteor showers and VLF atmospheric noise signals”, Journal of Atmospheric Electricity, Vol.31, No.1, pp.23-36 (2011)

- (16) K.Pierre, P.L.Rizzo, L. N.M.Paes (1985): "Survey of VLF-Omega transmissions received during summer in the Antarctic Peninsula", *Memoirs of National Institute of Polar Research*. Special issue 38, 106-111 (1985)
- (17) 早川正士 (2006): "地震電磁気現象の計測技術と研究動向", *電子情報通信学会論文誌 B* Vol.J89-B, No.7, pp.1036-1045 (2006)

## 発表実績

- (1) 荒船健人、芳原容英、岡田雅樹、山岸久雄、”南極昭和基地における VLF 帯送信電波を用いた電離層擾乱の観測可能性に関する調査”、日本大気電気学会第 90 回研究発表会(2014) (東京学芸大学、東京都)

# 付録

付録表 1 2008 年 6 月の日の出・日没時刻

## NAA

| 送信局 | 日付       | 日の出   | 南中       | 日の入   |
|-----|----------|-------|----------|-------|
|     |          | h:m   | h:m:s    | h:m   |
| NAA | 20080609 | 08:44 | 16:28:30 | 00:13 |
|     | 20080610 | 08:44 | 16:28:42 | 00:14 |
|     | 20080611 | 08:43 | 16:28:54 | 00:14 |
|     | 20080612 | 08:43 | 16:29:07 | 00:15 |
|     | 20080613 | 08:43 | 16:29:19 | 00:15 |
|     | 20080614 | 08:43 | 16:29:32 | 00:16 |
|     | 20080615 | 08:43 | 16:29:45 | 00:16 |
|     | 20080616 | 08:43 | 16:29:58 | 00:16 |
|     | 20080617 | 08:43 | 16:30:10 | 00:17 |
|     | 20080618 | 08:43 | 16:30:23 | 00:17 |
|     | 20080619 | 08:43 | 16:30:36 | 00:18 |
|     | 20080620 | 08:44 | 16:30:49 | 00:18 |
|     | 20080621 | 08:44 | 16:31:02 | 00:18 |
|     | 20080622 | 08:44 | 16:31:15 | 00:18 |
|     | 20080623 | 08:44 | 16:31:28 | 00:18 |
|     | 20080624 | 08:45 | 16:31:41 | 00:19 |
|     | 20080625 | 08:45 | 16:31:54 | 00:19 |
|     | 20080626 | 08:45 | 16:32:06 | 00:19 |
|     | 20080627 | 08:46 | 16:32:19 | 00:19 |

## NPM

| 送信局 | 日付       | 日の出   | 南中       | 日の入   |
|-----|----------|-------|----------|-------|
|     |          | h:m   | h:m:s    | h:m   |
| NPM | 20080609 | 15:50 | 22:32:01 | 05:14 |
|     | 20080610 | 15:50 | 22:32:13 | 05:14 |
|     | 20080611 | 15:50 | 22:32:25 | 05:15 |
|     | 20080612 | 15:50 | 22:32:38 | 05:15 |
|     | 20080613 | 15:50 | 22:32:50 | 05:15 |
|     | 20080614 | 15:50 | 22:33:03 | 05:16 |
|     | 20080615 | 15:50 | 22:33:16 | 05:16 |
|     | 20080616 | 15:50 | 22:33:29 | 05:16 |
|     | 20080617 | 15:51 | 22:33:42 | 05:17 |
|     | 20080618 | 15:51 | 22:33:55 | 05:17 |
|     | 20080619 | 15:51 | 22:34:08 | 05:17 |
|     | 20080620 | 15:51 | 22:34:21 | 05:17 |
|     | 20080621 | 15:51 | 22:34:34 | 05:18 |
|     | 20080622 | 15:52 | 22:34:46 | 05:18 |
|     | 20080623 | 15:52 | 22:34:59 | 05:18 |
|     | 20080624 | 15:52 | 22:35:12 | 05:18 |
|     | 20080625 | 15:52 | 22:35:25 | 05:18 |
|     | 20080626 | 15:53 | 22:35:37 | 05:18 |
|     | 20080627 | 15:53 | 22:35:50 | 05:19 |

## HWU

| 送信局 | 日付       | 日の出   | 南中       | 日の入   |
|-----|----------|-------|----------|-------|
|     |          | h:m   | h:m:s    | h:m   |
| HWU | 20080609 | 04:01 | 11:54:24 | 19:48 |
|     | 20080610 | 04:01 | 11:54:36 | 19:48 |
|     | 20080611 | 04:01 | 11:54:48 | 19:49 |
|     | 20080612 | 04:01 | 11:55:00 | 19:49 |
|     | 20080613 | 04:01 | 11:55:13 | 19:50 |
|     | 20080614 | 04:01 | 11:55:26 | 19:50 |
|     | 20080615 | 04:01 | 11:55:38 | 19:51 |
|     | 20080616 | 04:01 | 11:55:51 | 19:51 |
|     | 20080617 | 04:01 | 11:56:04 | 19:52 |
|     | 20080618 | 04:01 | 11:56:17 | 19:52 |
|     | 20080619 | 04:01 | 11:56:30 | 19:52 |
|     | 20080620 | 04:01 | 11:56:43 | 19:52 |
|     | 20080621 | 04:01 | 11:56:56 | 19:53 |
|     | 20080622 | 04:01 | 11:57:09 | 19:53 |
|     | 20080623 | 04:02 | 11:57:22 | 19:53 |
|     | 20080624 | 04:02 | 11:57:34 | 19:53 |
|     | 20080625 | 04:02 | 11:57:47 | 19:53 |
|     | 20080626 | 04:03 | 11:58:00 | 19:53 |
|     | 20080627 | 04:03 | 11:58:12 | 19:53 |

## NWC

| 送信局 | 日付       | 日の出   | 南中       | 日の入   |
|-----|----------|-------|----------|-------|
|     |          | h:m   | h:m:s    | h:m   |
| NWC | 20080609 | 22:58 | 04:22:36 | 09:48 |
|     | 20080610 | 22:58 | 04:22:48 | 09:48 |
|     | 20080611 | 22:59 | 04:23:00 | 09:48 |
|     | 20080612 | 22:59 | 04:23:12 | 09:48 |
|     | 20080613 | 22:59 | 04:23:25 | 09:48 |
|     | 20080614 | 23:00 | 04:23:38 | 09:48 |
|     | 20080615 | 23:00 | 04:23:50 | 09:48 |
|     | 20080616 | 23:00 | 04:24:03 | 09:48 |
|     | 20080617 | 23:00 | 04:24:16 | 09:48 |
|     | 20080618 | 23:01 | 04:24:29 | 09:49 |
|     | 20080619 | 23:01 | 04:24:42 | 09:49 |
|     | 20080620 | 23:01 | 04:24:55 | 09:49 |
|     | 20080621 | 23:01 | 04:25:08 | 09:49 |
|     | 20080622 | 23:01 | 04:25:21 | 09:49 |
|     | 20080623 | 23:02 | 04:25:34 | 09:50 |
|     | 20080624 | 23:02 | 04:25:46 | 09:50 |
|     | 20080625 | 23:02 | 04:25:59 | 09:50 |
|     | 20080626 | 23:02 | 04:26:12 | 09:50 |
|     | 20080627 | 23:02 | 04:26:24 | 09:51 |

## VTX3

| 送信局 | 日付       | 日の出   | 南中       | 日の入   |
|-----|----------|-------|----------|-------|
|     |          | h:m   | h:m:s    | h:m   |
| VTX | 20080609 | 00:30 | 06:48:13 | 13:06 |
|     | 20080610 | 00:30 | 06:48:25 | 13:07 |
|     | 20080611 | 00:30 | 06:48:37 | 13:07 |
|     | 20080612 | 00:31 | 06:48:50 | 13:07 |
|     | 20080613 | 00:31 | 06:49:02 | 13:07 |
|     | 20080614 | 00:31 | 06:49:15 | 13:08 |
|     | 20080615 | 00:31 | 06:49:28 | 13:08 |
|     | 20080616 | 00:31 | 06:49:40 | 13:08 |
|     | 20080617 | 00:31 | 06:49:53 | 13:08 |
|     | 20080618 | 00:32 | 06:50:06 | 13:09 |
|     | 20080619 | 00:32 | 06:50:19 | 13:09 |
|     | 20080620 | 00:32 | 06:50:32 | 13:09 |
|     | 20080621 | 00:32 | 06:50:45 | 13:09 |
|     | 20080622 | 00:33 | 06:50:58 | 13:09 |
|     | 20080623 | 00:33 | 06:51:11 | 13:10 |
|     | 20080624 | 00:33 | 06:51:24 | 13:10 |
|     | 20080625 | 00:33 | 06:51:36 | 13:10 |
|     | 20080626 | 00:33 | 06:51:49 | 13:10 |
|     | 20080627 | 00:34 | 06:52:02 | 13:10 |

## JJI

| 送信局 | 日付       | 日の出   | 南中       | 日の入   |
|-----|----------|-------|----------|-------|
|     |          | h:m   | h:m:s    | h:m   |
| JJJ | 20080609 | 20:10 | 03:16:00 | 10:22 |
|     | 20080610 | 20:10 | 03:16:11 | 10:23 |
|     | 20080611 | 20:10 | 03:16:24 | 10:23 |
|     | 20080612 | 20:10 | 03:16:36 | 10:23 |
|     | 20080613 | 20:10 | 03:16:48 | 10:24 |
|     | 20080614 | 20:10 | 03:17:01 | 10:24 |
|     | 20080615 | 20:10 | 03:17:14 | 10:25 |
|     | 20080616 | 20:10 | 03:17:26 | 10:25 |
|     | 20080617 | 20:10 | 03:17:39 | 10:25 |
|     | 20080618 | 20:10 | 03:17:52 | 10:25 |
|     | 20080619 | 20:11 | 03:18:05 | 10:26 |
|     | 20080620 | 20:11 | 03:18:18 | 10:26 |
|     | 20080621 | 20:11 | 03:18:31 | 10:26 |
|     | 20080622 | 20:11 | 03:18:44 | 10:26 |
|     | 20080623 | 20:12 | 03:18:57 | 10:27 |
|     | 20080624 | 20:12 | 03:19:10 | 10:27 |
|     | 20080625 | 20:12 | 03:19:23 | 10:27 |
|     | 20080626 | 20:12 | 03:19:35 | 10:27 |
|     | 20080627 | 20:13 | 03:19:48 | 10:27 |



## DHO38

| 送信局   | 日付       | 日の出   | 南中       | 日の入   |
|-------|----------|-------|----------|-------|
|       |          | h:m   | h:m:s    | h:m   |
| DHO38 | 20080609 | 03:04 | 11:28:52 | 19:54 |
|       | 20080610 | 03:04 | 11:29:04 | 19:55 |
|       | 20080611 | 03:03 | 11:29:16 | 19:56 |
|       | 20080612 | 03:03 | 11:29:28 | 19:56 |
|       | 20080613 | 03:03 | 11:29:41 | 19:57 |
|       | 20080614 | 03:03 | 11:29:53 | 19:57 |
|       | 20080615 | 03:02 | 11:30:06 | 19:58 |
|       | 20080616 | 03:02 | 11:30:19 | 19:58 |
|       | 20080617 | 03:02 | 11:30:32 | 19:59 |
|       | 20080618 | 03:02 | 11:30:45 | 19:59 |
|       | 20080619 | 03:03 | 11:30:58 | 19:59 |
|       | 20080620 | 03:03 | 11:31:11 | 20:00 |
|       | 20080621 | 03:03 | 11:31:24 | 20:00 |
|       | 20080622 | 03:03 | 11:31:37 | 20:00 |
|       | 20080623 | 03:03 | 11:31:49 | 20:00 |
|       | 20080624 | 03:04 | 11:32:02 | 20:00 |
|       | 20080625 | 03:04 | 11:32:15 | 20:00 |
|       | 20080626 | 03:05 | 11:32:28 | 20:00 |
|       | 20080627 | 03:05 | 11:32:40 | 20:00 |

## NLK

| 送信局 | 日付       | 日の出   | 南中       | 日の入   |
|-----|----------|-------|----------|-------|
|     |          | h:m   | h:m:s    | h:m   |
| NLK | 20080609 | 12:07 | 20:07:04 | 04:06 |
|     | 20080610 | 12:07 | 20:07:16 | 04:07 |
|     | 20080611 | 12:07 | 20:07:28 | 04:08 |
|     | 20080612 | 12:07 | 20:07:41 | 04:08 |
|     | 20080613 | 12:07 | 20:07:53 | 04:09 |
|     | 20080614 | 12:07 | 20:08:06 | 04:09 |
|     | 20080615 | 12:06 | 20:08:19 | 04:10 |
|     | 20080616 | 12:06 | 20:08:31 | 04:10 |
|     | 20080617 | 12:07 | 20:08:44 | 04:11 |
|     | 20080618 | 12:07 | 20:08:57 | 04:11 |
|     | 20080619 | 12:07 | 20:09:10 | 04:11 |
|     | 20080620 | 12:07 | 20:09:23 | 04:12 |
|     | 20080621 | 12:07 | 20:09:36 | 04:12 |
|     | 20080622 | 12:07 | 20:09:49 | 04:12 |
|     | 20080623 | 12:08 | 20:10:02 | 04:12 |
|     | 20080624 | 12:08 | 20:10:15 | 04:12 |
|     | 20080625 | 12:08 | 20:10:27 | 04:12 |
|     | 20080626 | 12:09 | 20:10:40 | 04:12 |
|     | 20080627 | 12:09 | 20:10:52 | 04:12 |

## 昭和基地

| 送信局  | 日付       | 日の出   | 南中       | 日の入   |
|------|----------|-------|----------|-------|
|      |          | h:m   | h:m:s    | h:m   |
| 昭和基地 | 20080609 | --:-- | 09:20:55 | --:-- |
|      | 20080610 | --:-- | 09:21:07 | --:-- |
|      | 20080611 | --:-- | 09:21:19 | --:-- |
|      | 20080612 | --:-- | 09:21:31 | --:-- |
|      | 20080613 | --:-- | 09:21:44 | --:-- |
|      | 20080614 | --:-- | 09:21:56 | --:-- |
|      | 20080615 | --:-- | 09:22:09 | --:-- |
|      | 20080616 | --:-- | 09:22:22 | --:-- |
|      | 20080617 | --:-- | 09:22:35 | --:-- |
|      | 20080618 | --:-- | 09:22:48 | --:-- |
|      | 20080619 | --:-- | 09:23:00 | --:-- |
|      | 20080620 | --:-- | 09:23:13 | --:-- |
|      | 20080621 | --:-- | 09:23:26 | --:-- |
|      | 20080622 | --:-- | 09:23:39 | --:-- |
|      | 20080623 | --:-- | 09:23:52 | --:-- |
|      | 20080624 | --:-- | 09:24:05 | --:-- |
|      | 20080625 | --:-- | 09:24:18 | --:-- |
|      | 20080626 | --:-- | 09:24:30 | --:-- |
|      | 20080627 | --:-- | 09:24:43 | --:-- |

付録表2 2014年1月10日11日と4月4日5日の日の出・日没時刻

| 送信局   | 日付       | 日の出   | 南中       | 日の入   |
|-------|----------|-------|----------|-------|
|       |          | h:m   | h:m:s    | h:m   |
| NWC   | 20140110 | 21:49 | 4:30:08  | 11:11 |
|       | 20140111 | 21:50 | 4:30:32  | 11:11 |
|       | 20140404 | 22:32 | 4:26:30  | 10:21 |
|       | 20140405 | 22:32 | 4:26:12  | 10:20 |
| VTX   | 20140110 | 1:06  | 6:56:26  | 12:47 |
|       | 20140111 | 1:07  | 6:56:50  | 12:47 |
|       | 20140404 | 0:45  | 6:52:04  | 12:59 |
|       | 20140405 | 0:45  | 6:51:47  | 12:59 |
| HWU   | 20140110 | 7:38  | 12:02:36 | 16:28 |
|       | 20140111 | 7:37  | 12:02:59 | 16:29 |
|       | 20140404 | 5:29  | 11:58:04 | 18:28 |
|       | 20140405 | 5:27  | 11:57:47 | 18:29 |
| ICV   | 20140110 | 6:45  | 11:28:39 | 16:12 |
|       | 20140111 | 6:45  | 11:29:03 | 16:13 |
|       | 20140404 | 5:00  | 11:24:09 | 17:49 |
|       | 20140405 | 4:58  | 11:23:51 | 17:50 |
| DHO38 | 20140110 | 7:40  | 11:37:07 | 15:35 |
|       | 20140111 | 7:39  | 11:37:31 | 15:37 |
|       | 20140404 | 4:57  | 11:32:37 | 18:10 |
|       | 20140405 | 4:54  | 11:32:19 | 18:11 |

| 送信局  | 日付       | 日の出   | 南中       | 日の入   |
|------|----------|-------|----------|-------|
|      |          | h:m   | h:m:s    | h:m   |
| GQD  | 20140110 | 8:30  | 12:19:00 | 16:08 |
|      | 20140111 | 8:29  | 12:19:24 | 16:10 |
|      | 20140404 | 5:36  | 12:14:28 | 18:54 |
|      | 20140405 | 5:34  | 12:14:11 | 18:56 |
| NAA  | 20140110 | 12:05 | 16:36:40 | 21:09 |
|      | 20140111 | 12:04 | 16:37:04 | 21:10 |
|      | 20140404 | 10:04 | 16:32:01 | 23:00 |
|      | 20140405 | 10:03 | 16:31:44 | 23:02 |
| NPM  | 20140110 | 17:12 | 22:40:18 | 4:08  |
|      | 20140111 | 17:13 | 22:40:42 | 4:08  |
|      | 20140404 | 16:23 | 22:35:29 | 4:48  |
|      | 20140405 | 16:22 | 22:35:11 | 4:49  |
| 昭和基地 | 20140110 | --:-- | 9:29:05  | --:-- |
|      | 20140111 | --:-- | 9:29:29  | --:-- |
|      | 20140404 | 4:15  | 9:24:38  | 14:33 |
|      | 20140405 | 4:18  | 9:24:21  | 14:29 |

白夜: 20131122 ~ 20140119

付録表3 東西成分と南北成分の比による角度の計算

1 月

|                    | 周波数<br>項目 | NWC    | ICV   | HWU   | GQD   | DHO38 | NAA   |       |
|--------------------|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    |           | 19.8   | 20.3  | 21.75 | 19.6  | 22.1  | 23.4  | 24    |
| 2014年01月10日<br>20時 | 観測の経度     | 114    | 9.7   | 1     | -2    | -2    | 7     | -67   |
|                    | MAX-MIN   | 2.82   | 1.94  | 0.65  | 1.67  | 1.14  | 0.65  | 4.96  |
|                    | 標準偏差      | 1.10   | 0.85  | 0.26  | 0.63  | 0.47  | 0.25  | 1.85  |
|                    | 平均        | 32.89  | 7.59  | 4.01  | 7.97  | 4.65  | 4.94  | 16.35 |
|                    | 差         | -81.11 | -2.11 | 3.01  | 9.97  | 6.65  | -2.06 | 83.35 |
|                    | 90° 回転    | 8.99   |       |       |       |       |       | -6.65 |
| 2014年01月10日<br>21時 | MAX-MIN   | 3.73   | 1.14  | 0.38  | 1.42  | 0.38  | 0.86  | 4.15  |
|                    | 標準偏差      | 1.63   | 0.42  | 0.15  | 0.62  | 0.13  | 0.32  | 1.81  |
|                    | 平均        | 31.20  | 6.24  | 3.82  | 5.73  | 4.27  | 4.81  | 15.93 |
|                    | 差         | -82.80 | -3.46 | 2.82  | 7.73  | 6.27  | -2.19 | 82.93 |
|                    | 90° 回転    | 7.20   |       |       |       |       |       | -7.07 |
|                    | MAX-MIN   | 2.79   | 0.44  | 0.27  | 1.14  | 0.74  | 0.93  | 2.26  |
| 2014年01月10日<br>22時 | 標準偏差      | 1.09   | 0.16  | 0.12  | 0.37  | 0.34  | 0.35  | 0.81  |
|                    | 平均        | 29.53  | 5.67  | 4.16  | 5.03  | 4.70  | 5.46  | 13.23 |
|                    | 差         | -84.47 | -4.03 | 3.16  | 7.03  | 6.70  | -1.54 | 80.23 |
|                    | 90° 回転    | 5.53   |       |       |       |       |       | -9.77 |
|                    | MAX-MIN   | 5.13   | 0.87  | 0.15  | 1.02  | 0.48  | 1.13  | 5.00  |
|                    | 標準偏差      | 0.41   | 0.33  | 0.06  | 0.42  | 0.16  | 0.42  | 1.99  |
| 2014年01月10日<br>23時 | 平均        | 28.28  | 6.73  | 4.11  | 5.25  | 4.93  | 5.61  | 13.73 |
|                    | 差         | -85.72 | -2.97 | 3.11  | 7.25  | 6.93  | -1.39 | 80.73 |
|                    | 90° 回転    | 4.28   |       |       |       |       |       | -9.27 |
|                    | MAX-MIN   | 0.40   | 2.64  | 0.63  | 3.04  | 1.25  | 1.28  | 2.18  |
|                    | 標準偏差      | 0.38   | 1.14  | 0.21  | 1.13  | 0.45  | 0.52  | 0.87  |
|                    | 平均        | 28.49  | 6.33  | 4.37  | 6.79  | 5.03  | 5.33  | 13.63 |
| 2014年01月11日<br>0時  | 差         | -85.51 | -1.97 | 3.97  | 8.79  | 7.03  | -1.67 | 80.63 |
|                    | 90° 回転    | 4.49   |       |       |       |       |       | -9.37 |
|                    | MAX-MIN   | 0.73   | 2.31  | 0.46  | 1.41  | 0.77  | 1.05  | 1.90  |
|                    | 標準偏差      | 0.25   | 0.80  | 0.18  | 0.51  | 0.29  | 0.43  | 0.72  |
|                    | 平均        | 28.46  | 10.45 | 5.03  | 8.37  | 5.56  | 6.77  | 13.63 |
|                    | 差         | -85.54 | 0.75  | 4.03  | 10.37 | 7.56  | -0.23 | 80.63 |
| 2014年01月11日<br>1時  | 90° 回転    | 4.46   |       |       |       |       |       | -9.37 |
|                    | MAX-MIN   | 0.68   | 2.48  | 0.43  | 3.09  | 0.82  | 1.19  | 5.15  |
|                    | 標準偏差      | 0.25   | 0.90  | 0.16  | 1.08  | 0.29  | 0.51  | 1.87  |
|                    | 平均        | 28.41  | 11.92 | 5.79  | 10.56 | 6.87  | 7.79  | 16.64 |
|                    | 差         | -85.59 | 2.22  | 4.79  | 12.56 | 8.87  | 0.79  | 83.64 |
|                    | 90° 回転    | 4.41   |       |       |       |       |       | -6.36 |
| 2014年01月11日<br>2時  | MAX-MIN   | 0.58   | 5.50  | 0.77  | 4.45  | 0.95  | 1.82  | 2.58  |
|                    | 標準偏差      | 0.21   | 2.14  | 0.26  | 1.66  | 0.40  | 0.61  | 1.01  |
|                    | 平均        | 28.60  | 17.13 | 6.10  | 12.66 | 7.25  | 8.55  | 13.59 |
|                    | 差         | -85.40 | 7.43  | 5.10  | 14.66 | 9.25  | 1.55  | 80.59 |
|                    | 90° 回転    | 4.60   |       |       |       |       |       | -9.41 |
|                    | MAX-MIN   | 0.78   | 4.97  | 1.65  | 9.71  | 5.37  | 2.78  | 1.73  |
| 2014年01月11日<br>3時  | 標準偏差      | 0.27   | 1.75  | 0.60  | 3.76  | 1.99  | 1.00  | 0.43  |
|                    | 平均        | 28.47  | 23.32 | 6.39  | 19.38 | 10.83 | 10.22 | 14.71 |
|                    | 差         | -85.53 | 13.62 | 5.39  | 21.38 | 12.83 | 3.22  | 81.71 |
|                    | 90° 回転    | 4.47   |       |       |       |       |       | -8.29 |
|                    | MAX-MIN   | 0.68   | 4.20  | 6.73  | 3.36  | 6.18  | 6.83  | 17.21 |
|                    | 標準偏差      | 0.24   | 1.53  | 2.76  | 1.30  | 2.32  | 2.67  | 6.99  |
| 2014年01月11日<br>4時  | 平均        | 28.67  | 26.58 | 11.40 | 26.29 | 16.75 | 13.72 | 22.02 |
|                    | 差         | -85.33 | 16.88 | 10.40 | 28.29 | 18.75 | 6.72  | 89.02 |
|                    | 90° 回転    | 4.67   |       |       |       |       |       | -9.88 |

|                   |         | NWC     | ICV    | HWU    | GQD    | DHO38  | NAA    |        |
|-------------------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                   | 項目      | 19.9    | 20.3   | 21.75  | 19.6   | 22.1   | 23.4   | 24     |
| 2014年01月11日<br>0時 | 観測上の角度  | 136     | 25     | 22     | 19     | 19     | 22     | -35    |
|                   | MAX-MIN | 0.56    | 4.64   | 11.25  | 3.79   | 6.27   | 6.71   | 3.76   |
|                   | 標準偏差    | 0.22    | 1.79   | 4.84   | 1.40   | 2.52   | 2.70   | 1.39   |
|                   | 平均      | 28.58   | 26.67  | 17.71  | 28.33  | 22.61  | 15.04  | 15.50  |
|                   | 差       | -107.42 | 1.67   | -4.29  | 9.33   | 3.61   | -6.96  | 50.50  |
|                   | 90° 回転  | -17.42  |        |        |        |        |        | -39.50 |
| 2014年01月11日<br>1時 | MAX-MIN | 8.69    | 8.54   | 6.58   | 7.12   | 12.79  | 6.34   | 1.62   |
|                   | 標準偏差    | 3.43    | 3.06   | 2.84   | 2.38   | 4.90   | 2.07   | 0.56   |
|                   | 平均      | 38.43   | 24.16  | 16.53  | 29.25  | 20.92  | 17.95  | 15.68  |
|                   | 差       | -97.57  | -0.94  | -5.47  | 10.25  | 1.92   | -4.05  | 50.68  |
|                   | 90° 回転  | -7.57   |        |        |        |        |        | -39.32 |
|                   | MAX-MIN | 4.37    | 8.51   | 9.76   | 5.66   | 9.07   | 6.09   | 1.45   |
| 2014年01月11日<br>1時 | 標準偏差    | 1.68    | 2.95   | 3.77   | 1.97   | 3.63   | 2.65   | 0.55   |
|                   | 平均      | 42.08   | 21.77  | 13.35  | 31.00  | 22.49  | 13.19  | 16.13  |
|                   | 差       | -93.92  | -3.23  | -8.65  | 12.00  | 3.49   | -8.81  | 51.13  |
|                   | 90° 回転  | -3.92   |        |        |        |        |        | -38.87 |
|                   | MAX-MIN | 2.61    | 6.00   | 2.13   | 14.52  | 5.58   | 2.19   | 1.90   |
|                   | 標準偏差    | 1.00    | 2.24   | 0.76   | 5.08   | 2.27   | 0.89   | 0.46   |
| 2014年01月11日<br>1時 | 平均      | 38.16   | 14.26  | 6.02   | 19.74  | 10.65  | 7.44   | 16.26  |
|                   | 差       | -97.84  | -10.74 | -15.98 | 0.74   | -8.35  | -14.56 | 51.26  |
|                   | 90° 回転  | -7.84   |        |        |        |        |        | -38.74 |
|                   | MAX-MIN | 1.91    | 3.08   | 0.87   | 2.75   | 2.23   | 1.14   | 6.16   |
|                   | 標準偏差    | 0.78    | 1.19   | 0.35   | 0.98   | 0.84   | 0.38   | 2.38   |
|                   | 平均      | 36.47   | 10.16  | 4.87   | 10.50  | 6.56   | 6.34   | 18.55  |
| 2014年01月11日<br>2時 | 差       | -99.53  | -14.94 | -17.13 | -8.50  | -12.44 | -15.66 | 53.55  |
|                   | 90° 回転  | -3.53   |        |        |        |        |        | -38.45 |
|                   | MAX-MIN | 8.95    | 1.85   | 0.56   | 2.63   | 0.98   | 0.80   | 0.24   |
|                   | 標準偏差    | 3.42    | 0.73   | 0.22   | 1.01   | 0.35   | 0.31   | 3.22   |
|                   | 平均      | 35.62   | 9.58   | 4.04   | 7.13   | 5.10   | 5.26   | 22.01  |
|                   | 差       | -100.38 | -15.42 | -17.96 | -11.87 | -13.90 | -16.74 | 57.01  |
| 2014年01月11日<br>2時 | 90° 回転  | -10.38  |        |        |        |        |        | -32.99 |
|                   | MAX-MIN | 6.73    | 2.01   | 0.28   | 0.34   | 0.55   | 1.48   | 5.72   |
|                   | 標準偏差    | 2.56    | 0.73   | 0.11   | 0.15   | 0.21   | 0.53   | 2.05   |
|                   | 平均      | 31.81   | 7.05   | 3.44   | 5.55   | 4.46   | 4.68   | 17.43  |
|                   | 差       | -104.19 | -17.95 | -18.56 | -13.45 | -14.54 | -17.32 | 52.43  |
|                   | 90° 回転  | -14.19  |        |        |        |        |        | -37.57 |
| 2014年01月11日<br>2時 | MAX-MIN | 0.76    | 3.75   | 0.29   | 0.56   | 0.34   | 0.59   | 2.19   |
|                   | 標準偏差    | 0.27    | 1.66   | 0.11   | 0.20   | 0.11   | 0.24   | 0.89   |
|                   | 平均      | 29.80   | 7.90   | 3.57   | 5.47   | 4.09   | 4.51   | 12.41  |
|                   | 差       | -108.20 | -17.10 | -18.43 | -13.53 | -14.91 | -17.49 | 47.41  |
|                   | 90° 回転  | -15.20  |        |        |        |        |        | -42.59 |
|                   | MAX-MIN | 1.13    | 2.83   | 0.12   | 0.56   | 0.51   | 0.84   | 2.81   |
| 2014年01月11日<br>2時 | 標準偏差    | 0.40    | 1.05   | 0.05   | 0.22   | 0.19   | 0.34   | 1.13   |
|                   | 平均      | 29.59   | 14.41  | 3.69   | 6.95   | 4.37   | 7.79   | 13.49  |
|                   | 差       | -106.41 | -10.59 | -18.31 | -12.05 | -14.63 | -17.21 | 48.49  |
|                   | 90° 回転  | -16.41  |        |        |        |        |        | -41.51 |
|                   | MAX-MIN |         |        |        |        |        |        |        |
|                   | 標準偏差    |         |        |        |        |        |        |        |

4 月

|                    |         | HWU  | NWC    | ICV   | GQD   | DHO38 | NAA   |
|--------------------|---------|------|--------|-------|-------|-------|-------|
|                    | 周波数     | 18.3 | 19.8   | 20.3  | 22.1  | 23.4  | 24    |
| 2014年04月04日<br>0時  | 観測上の経度  | 22   | 136    | 25    | 19    | 22    | -35   |
|                    | MAX-MIN | 1.20 | 3.31   | 3.37  | 5.86  | 1.16  | 8.88  |
|                    | 標準偏差    | 0.41 | 1.16   | 1.22  | 2.09  | 0.45  | 3.43  |
|                    | 平均      | 5.12 | 27.49  | 9.47  | 12.39 | 7.52  | 19.25 |
|                    | 差       | 4.12 | -86.51 | -0.23 | 14.39 | 0.52  | 86.25 |
|                    | 90° 回転  |      | 3.49   |       |       |       | -3.75 |
| 2014年04月04日<br>0時  | MAX-MIN | 1.45 | 0.57   | 3.57  | 4.80  | 0.95  | 1.20  |
|                    | 標準偏差    | 0.54 | 0.22   | 1.37  | 1.82  | 0.34  | 0.49  |
|                    | 平均      | 5.27 | 27.74  | 11.16 | 11.20 | 7.50  | 17.80 |
|                    | 差       | 4.27 | -86.26 | 1.46  | 13.20 | 0.50  | 84.80 |
|                    | 90° 回転  |      | 3.74   |       |       |       | -5.20 |
|                    | MAX-MIN | 0.88 | 1.38   | 1.59  | 2.56  | 1.34  | 3.91  |
| 2014年04月04日<br>10時 | 標準偏差    | 0.30 | 0.47   | 0.57  | 1.00  | 0.45  | 1.57  |
|                    | 平均      | 4.95 | 27.36  | 9.06  | 10.41 | 7.66  | 18.54 |
|                    | 差       | 3.95 | -86.64 | -0.64 | 12.41 | 0.66  | 85.54 |
|                    | 90° 回転  |      | 3.36   |       |       |       | -4.46 |
|                    | MAX-MIN | 0.65 | 2.91   | 3.00  | 3.47  | 1.66  | 5.15  |
|                    | 標準偏差    | 0.25 | 1.28   | 1.08  | 1.52  | 0.62  | 1.98  |
| 2014年04月04日<br>11時 | 平均      | 5.22 | 26.66  | 9.42  | 11.28 | 7.86  | 16.58 |
|                    | 差       | 4.22 | -87.34 | -0.28 | 13.28 | 0.86  | 83.58 |
|                    | 90° 回転  |      | 2.66   |       |       |       | -6.42 |
|                    | MAX-MIN | 0.59 | 3.60   | 1.38  | 3.72  | 0.81  | 1.77  |
|                    | 標準偏差    | 0.20 | 1.52   | 0.65  | 1.42  | 0.30  | 0.76  |
|                    | 平均      | 4.85 | 31.77  | 9.35  | 9.99  | 7.57  | 16.29 |
| 2014年04月04日<br>12時 | 差       | 3.85 | -82.23 | -0.35 | 11.99 | 0.57  | 83.29 |
|                    | 90° 回転  |      | 7.77   |       |       |       | -6.71 |
|                    | MAX-MIN | 0.67 | 3.92   | 2.34  | 2.16  | 0.97  | 1.76  |
|                    | 標準偏差    | 0.25 | 1.49   | 0.77  | 0.72  | 0.32  | 0.65  |
|                    | 平均      | 5.13 | 29.46  | 10.70 | 10.33 | 7.60  | 15.65 |
|                    | 差       | 4.13 | -84.54 | 1.00  | 12.33 | 0.60  | 82.65 |
| 2014年04月04日<br>13時 | 90° 回転  |      | 5.46   |       |       |       | -7.35 |
|                    | MAX-MIN | 1.85 | 4.42   | 1.60  | 2.56  | 2.25  | 0.60  |
|                    | 標準偏差    | 0.61 | 1.60   | 0.57  | 1.05  | 0.83  | 0.21  |
|                    | 平均      | 5.84 | 25.20  | 12.00 | 11.54 | 8.43  | 15.35 |
|                    | 差       | 4.84 | -88.80 | 2.30  | 13.54 | 1.43  | 82.35 |
|                    | 90° 回転  |      | 1.20   |       |       |       | -7.65 |
| 2014年04月04日<br>14時 | MAX-MIN | 2.93 | 1.41   | 6.58  | 11.09 | 4.65  | 0.54  |
|                    | 標準偏差    | 1.08 | 0.49   | 2.67  | 4.06  | 1.90  | 0.20  |
|                    | 平均      | 6.95 | 22.42  | 16.34 | 15.04 | 9.51  | 15.58 |
|                    | 差       | 5.95 | -91.58 | 6.64  | 17.04 | 2.51  | 82.58 |
|                    | 90° 回転  |      | -1.58  |       |       |       | -7.42 |
|                    | MAX-MIN | 3.26 | 1.33   | 4.25  | 6.48  | 5.66  | 5.24  |
| 2014年04月04日<br>16時 | 標準偏差    | 1.20 | 0.54   | 1.83  | 2.38  | 2.60  | 1.85  |
|                    | 平均      | 9.28 | 23.09  | 18.08 | 16.90 | 15.32 | 17.45 |
|                    | 差       | 8.28 | -90.91 | 0.39  | 18.90 | 0.32  | 84.45 |
|                    | 90° 回転  |      | -0.91  |       |       |       | -5.56 |
|                    | MAX-MIN | 4.03 | 9.28   | 4.60  | 5.37  | 4.03  | 6.69  |
|                    | 標準偏差    | 1.60 | 4.04   | 2.05  | 1.92  | 1.30  | 2.72  |
| 2014年04月04日<br>17時 | 平均      | 5.53 | 26.88  | 8.95  | 13.02 | 9.26  | 18.42 |
|                    | 差       | 4.53 | -87.12 | -0.75 | 15.02 | 2.26  | 85.42 |
|                    | 90° 回転  |      | 2.88   |       |       |       | -4.58 |

付録表 4 東西成分と南北成分の比による角度の計算(南極点に置いたと仮定)

1 月

|                    |         | NWC     | ICV    | HWU    |        | GOD    | DHO38  | NAA    |
|--------------------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                    | 周波数     | 19.8    | 20.3   | 21.75  |        | 19.6   | 22.1   | 23.4   |
|                    | 観測上の角度  |         |        |        |        |        |        |        |
| 2014年01月10日<br>20時 | MAX-MIN | 2.82    | 1.94   | 0.65   | 1.67   | 1.14   | 0.65   | 4.96   |
|                    | 標準偏差    | 1.10    | 0.65   | 0.26   | 0.63   | 0.47   | 0.25   | 1.85   |
|                    | 平均      | 32.89   | 7.59   | 4.01   | 7.97   | 4.65   | 4.94   | 16.35  |
|                    | 差       | -103.11 | -17.41 | -17.99 | -11.03 | -14.35 | -17.06 | 51.35  |
|                    | 90° 回転  | -13.11  |        |        |        |        |        | -38.65 |
|                    | MAX-MIN | 3.73    | 1.14   | 0.38   | 1.42   | 0.38   | 0.86   | 4.15   |
| 2014年01月10日<br>21時 | 標準偏差    | 1.63    | 0.42   | 0.15   | 0.62   | 0.13   | 0.32   | 1.81   |
|                    | 平均      | 31.20   | 6.24   | 3.82   | 5.73   | 4.27   | 4.81   | 15.93  |
|                    | 差       | -104.80 | -18.76 | -18.18 | -13.27 | -14.73 | -17.19 | 50.93  |
|                    | 90° 回転  | -14.80  |        |        |        |        |        | -39.07 |
|                    | MAX-MIN | 2.79    | 0.44   | 0.27   | 1.14   | 0.74   | 0.93   | 2.26   |
|                    | 標準偏差    | 1.09    | 0.16   | 0.12   | 0.37   | 0.34   | 0.35   | 0.81   |
| 2014年01月10日<br>22時 | 平均      | 29.53   | 5.67   | 4.16   | 5.03   | 4.70   | 5.46   | 13.23  |
|                    | 差       | -106.47 | -19.33 | -17.84 | -13.97 | -14.30 | -16.54 | 48.23  |
|                    | 90° 回転  | -16.47  |        |        |        |        |        | -41.77 |
|                    | MAX-MIN | 1.13    | 0.87   | 0.15   | 1.02   | 0.48   | 1.13   | 5.00   |
|                    | 標準偏差    | 0.41    | 0.33   | 0.06   | 0.42   | 0.16   | 0.42   | 1.99   |
|                    | 平均      | 28.28   | 6.73   | 4.11   | 5.25   | 4.93   | 5.61   | 13.73  |
| 2014年01月10日<br>23時 | 差       | -107.72 | -18.27 | -17.89 | -13.75 | -14.07 | -16.39 | 48.73  |
|                    | 90° 回転  | -17.72  |        |        |        |        |        | -41.27 |
|                    | MAX-MIN | 1.00    | 2.64   | 0.63   | 3.04   | 1.25   | 1.28   | 2.18   |
|                    | 標準偏差    | 0.38    | 1.14   | 0.21   | 1.13   | 0.45   | 0.52   | 0.87   |
|                    | 平均      | 28.49   | 8.33   | 4.37   | 6.79   | 5.03   | 5.33   | 13.63  |
|                    | 差       | -107.51 | -16.67 | -17.63 | -12.21 | -13.97 | -16.67 | 48.63  |
| 2014年01月11日<br>0時  | 90° 回転  | -17.51  |        |        |        |        |        | -41.37 |
|                    | MAX-MIN | 0.73    | 2.31   | 0.46   | 1.41   | 0.77   | 1.05   | 1.90   |
|                    | 標準偏差    | 0.25    | 0.80   | 0.18   | 0.51   | 0.29   | 0.43   | 0.72   |
|                    | 平均      | 28.46   | 10.45  | 5.03   | 8.37   | 5.56   | 6.77   | 13.63  |
|                    | 差       | -107.54 | -14.55 | -16.97 | -10.63 | -13.44 | -15.23 | 48.63  |
|                    | 90° 回転  | -17.54  |        |        |        |        |        | -41.37 |
| 2014年01月11日<br>1時  | MAX-MIN | 0.68    | 2.48   | 0.43   | 3.09   | 0.82   | 1.19   | 5.15   |
|                    | 標準偏差    | 0.25    | 0.90   | 0.16   | 1.08   | 0.29   | 0.51   | 1.87   |
|                    | 平均      | 28.41   | 11.92  | 5.79   | 10.66  | 6.87   | 7.79   | 16.84  |
|                    | 差       | -107.58 | -13.08 | -16.21 | -8.44  | -12.13 | -14.21 | 51.64  |
|                    | 90° 回転  | -17.58  |        |        |        |        |        | -38.36 |
|                    | MAX-MIN | 0.58    | 5.50   | 0.77   | 4.45   | 0.95   | 1.82   | 2.58   |
| 2014年01月11日<br>2時  | 標準偏差    | 0.21    | 2.14   | 0.26   | 1.66   | 0.40   | 0.61   | 1.01   |
|                    | 平均      | 28.60   | 17.13  | 6.10   | 12.66  | 7.25   | 8.55   | 13.59  |
|                    | 差       | -107.40 | -7.87  | -15.90 | -6.34  | -11.75 | -13.45 | 46.59  |
|                    | 90° 回転  | -17.40  |        |        |        |        |        | -41.60 |
|                    | MAX-MIN | 0.78    | 4.97   | 1.65   | 3.71   | 5.37   | 2.78   | 1.17   |
|                    | 標準偏差    | 0.27    | 1.75   | 0.60   | 3.76   | 1.99   | 1.00   | 0.48   |
| 2014年01月11日<br>3時  | 平均      | 28.47   | 23.32  | 6.39   | 19.38  | 10.83  | 10.22  | 14.71  |
|                    | 差       | -107.53 | -1.68  | -15.61 | 0.38   | -8.17  | -11.78 | 49.71  |
|                    | 90° 回転  | -17.53  |        |        |        |        |        | -40.29 |
|                    | MAX-MIN | 0.68    | 4.20   | 6.73   | 3.36   | 6.18   | 6.83   | 1.21   |
|                    | 標準偏差    | 0.24    | 1.53   | 2.76   | 1.30   | 2.32   | 2.57   | 6.99   |
|                    | 平均      | 28.67   | 26.58  | 11.40  | 26.29  | 16.75  | 13.72  | 22.02  |
| 2014年01月11日<br>4時  | 差       | -107.33 | 1.58   | -10.60 | 7.29   | -2.25  | -8.28  | 57.02  |
|                    | 90° 回転  | -17.33  |        |        |        |        |        | -32.98 |

|                    |         | NWC     | ICV    | HWU    | GOD    | DHO38  | NAA    |        |
|--------------------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                    | 周波数     | 19.8    | 20.3   | 21.75  | 19.6   | 22.1   | 23.4   | 24     |
|                    | 観測上の角度  | 136     | 25     | 22     | 19     | 19     | 22     | -35    |
| 2014年01月11日<br>6時  | MAX-MIN | 0.56    | 4.94   | 11.25  | 3.79   | 6.27   | 6.71   | 3.76   |
|                    | 標準偏差    | 0.22    | 1.79   | 4.84   | 1.40   | 2.52   | 2.70   | 1.98   |
|                    | 平均      | 28.58   | 26.67  | 17.71  | 28.33  | 22.61  | 15.04  | 15.50  |
|                    | 差       | -107.42 | 1.87   | -4.29  | 9.33   | 3.61   | -6.96  | 50.50  |
|                    | 90° 回転  | -17.42  |        |        |        |        |        | -39.50 |
| 2014年01月11日<br>1時  | MAX-MIN | 8.99    | 8.54   | 6.58   | 7.12   | 12.79  | 6.34   | 6.82   |
|                    | 標準偏差    | 3.43    | 3.06   | 2.84   | 2.38   | 4.90   | 2.07   | 0.56   |
|                    | 平均      | 38.43   | 24.16  | 16.53  | 29.25  | 20.92  | 17.95  | 15.68  |
|                    | 差       | -97.57  | -0.84  | -5.47  | 10.25  | 1.92   | -4.05  | 50.68  |
|                    | 90° 回転  | -7.57   |        |        |        |        |        | -39.32 |
| 2014年01月11日<br>17時 | MAX-MIN | 4.37    | 8.51   | 9.76   | 5.66   | 9.07   | 6.09   | 1.45   |
|                    | 標準偏差    | 1.68    | 2.95   | 3.77   | 1.97   | 3.63   | 2.65   | 0.55   |
|                    | 平均      | 42.08   | 21.77  | 13.95  | 31.00  | 22.49  | 13.19  | 16.13  |
|                    | 差       | -93.92  | -2.37  | -8.65  | 12.00  | 3.49   | -8.81  | 51.13  |
|                    | 90° 回転  | -3.92   |        |        |        |        |        | -38.87 |
| 2014年01月11日<br>18時 | MAX-MIN | 2.61    | 6.00   | 2.13   | 14.52  | 5.58   | 2.19   | 1.30   |
|                    | 標準偏差    | 1.00    | 2.24   | 0.76   | 6.08   | 2.27   | 0.89   | 0.46   |
|                    | 平均      | 38.16   | 14.26  | 6.02   | 19.74  | 10.65  | 7.44   | 16.26  |
|                    | 差       | -97.84  | -10.74 | -15.98 | 0.74   | -8.35  | -14.55 | 51.26  |
|                    | 90° 回転  | -7.84   |        |        |        |        |        | -38.74 |
| 2014年01月11日<br>18時 | MAX-MIN | 0.78    | 1.19   | 0.35   | 0.95   | 0.84   | 0.38   | 2.38   |
|                    | 標準偏差    | 0.36    | 1.01   | 0.47   | 1.05   | 0.56   | 0.34   | 1.85   |
|                    | 平均      | 36.47   | 10.16  | 4.87   | 10.50  | 6.56   | 6.34   | 18.55  |
|                    | 差       | -93.53  | -15.42 | -17.13 | -8.50  | -12.44 | -15.66 | 53.55  |
|                    | 90° 回転  | -13.53  |        |        |        |        |        | -38.45 |
| 2014年01月11日<br>2時  | MAX-MIN | 3.95    | 1.85   | 0.56   | 2.63   | 0.99   | 0.80   | 8.24   |
|                    | 標準偏差    | 3.42    | 0.73   | 0.22   | 1.01   | 0.35   | 0.31   | 3.22   |
|                    | 平均      | 35.62   | 9.58   | 4.04   | 7.13   | 5.10   | 5.26   | 22.01  |
|                    | 差       | -100.36 | -15.42 | -17.96 | -11.87 | -13.90 | -16.74 | 57.01  |
|                    | 90° 回転  | -13.36  |        |        |        |        |        | -32.99 |
| 2014年01月11日<br>21時 | MAX-MIN | 6.75    | 2.01   | 0.28   | 0.34   | 0.55   | 1.48   | 5.72   |
|                    | 標準偏差    | 2.56    | 0.73   | 0.11   | 0.15   | 0.21   | 0.53   | 2.06   |
|                    | 平均      | 31.81   | 7.05   | 3.44   | 5.55   | 4.46   | 4.68   | 17.43  |
|                    | 差       | -104.15 | -17.95 | -18.56 | -13.45 | -14.54 | -17.32 | 52.57  |
|                    | 90° 回転  | -17.95  |        |        |        |        |        | -32.57 |
| 2014年01月11日<br>2時  | MAX-MIN | 0.76    | 3.75   | 0.29   | 0.58   | 0.34   | 0.59   | 2.19   |
|                    | 標準偏差    | 0.27    | 1.66   | 0.11   | 0.20   | 0.11   | 0.24   | 0.89   |
|                    | 平均      | 29.80   | 7.90   | 3.57   | 5.47   | 4.09   | 4.51   | 12.41  |
|                    | 差       | -105.20 | -17.10 | -18.43 | -13.53 | -14.91 | -17.49 | 47.41  |
|                    | 90° 回転  | -16.20  |        |        |        |        |        | -42.59 |
| 2014年01月11日<br>2時  | MAX-MIN | 1.13    | 2.83   | 0.12   | 0.55   | 0.51   | 0.84   | 2.81   |
|                    | 標準偏差    | 0.46    | 1.05   | 0.05   | 0.22   | 0.19   | 0.34   | 1.13   |
|                    | 平均      | 29.59   | 14.41  | 3.69   | 6.95   | 4.37   | 4.79   | 13.49  |
|                    | 差       | -106.41 | -10.59 | -18.31 | -12.05 | -14.63 | -17.21 | 48.49  |
|                    | 90° 回転  | -18.41  |        |        |        |        |        | -41.51 |

4 月

|  |         | HWU    | NWC     | ICV    | GOD   | DHO38  | NAA    |
|--|---------|--------|---------|--------|-------|--------|--------|
|  | 周波数     | 18.3   | 19.8    | 20.3   | 22.1  | 23.4   | 24     |
|  | 観測上の経度  | 22     | 136     | 25     | 19    | 22     | -35    |
|  | MAX-MIN | 1.20   | 3.31    | 3.37   | 5.86  | 1.16   | 8.88   |
|  | 標準偏差    | 0.41   | 1.16    | 1.22   | 2.09  | 0.45   | 3.43   |
|  | 平均      | 5.12   | 27.49   | 9.47   | 12.39 | 7.52   | 19.25  |
|  | 差       | -16.88 | -108.51 | -15.53 | -6.61 | -14.48 | 54.25  |
|  | 90° 回転  | -18.51 |         |        |       |        | -35.75 |
|  | MAX-MIN | 1.45   | 0.57    | 3.57   | 4.80  | 0.95   | 1.20   |
|  | 標準偏差    | 0.54   | 0.22    | 1.37   | 1.82  | 0.34   | 0.49   |
|  | 平均      | 5.27   | 27.74   | 11.16  | 11.20 | 7.50   | 17.80  |
|  | 差       | -16.73 | -108.26 | -13.84 | -7.80 | -14.50 | 52.80  |
|  | 90° 回転  | -18.26 |         |        |       |        | -37.20 |
|  | MAX-MIN | 0.88   | 1.38    | 1.59   | 2.56  | 1.34   | 3.11   |
|  | 標準偏差    | 0.30   | 0.47    | 0.57   | 1.00  | 0.45   | 1.57   |
|  | 平均      | 4.95   | 27.36   | 9.06   | 10.41 | 7.56   | 18.54  |
|  | 差       | -17.05 | -108.64 | -15.94 | -8.59 | -14.34 | 53.54  |
|  | 90° 回転  | -18.64 |         |        |       |        | -36.46 |
|  | MAX-MIN | 0.65   | 2.91    | 3.00   | 3.47  | 1.66   | 5.15   |
|  | 標準偏差    | 0.25   | 1.28    | 1.08   | 1.52  | 0.62   | 1.98   |
|  | 平均      | 5.22   | 26.66   | 9.42   | 11.28 | 7.86   | 16.58  |
|  | 差       | -16.78 | -109.34 | -15.58 | -7.72 | -14.14 | 51.58  |
|  | 90° 回転  | -19.34 |         |        |       |        | -38.42 |
|  | MAX-MIN | 0.59   | 3.60    | 1.38   | 3.72  | 0.81   | 1.77   |
|  | 標準偏差    | 0.20   | 1.52    | 0.65   | 1.42  | 0.30   | 0.76   |
|  | 平均      | 4.85   | 31.77   | 9.35   | 9.99  | 7.57   | 16.29  |
|  | 差       | -17.15 | -104.23 | -15.65 | -9.01 | -14.43 | 51.29  |
|  | 90° 回転  | -14.23 |         |        |       |        | -38.71 |
|  | MAX-MIN | 0.67   | 3.92    | 2.34   | 2.16  | 0.97   | 1.76   |
|  | 標準偏差    | 0.25   | 1.49    | 0.77   | 0.72  | 0.32   | 0.65   |
|  | 平均      | 5.13   | 29.46   | 10.70  | 10.33 | 7.60   | 15.65  |
|  | 差       | -16.87 | -106.54 | -14.30 | -8.67 | -14.40 | 50.65  |
|  | 90° 回転  | -16.54 |         |        |       |        | -39.35 |
|  | MAX-MIN | 1.85   | 4.42    | 1.60   | 2.56  | 2.25   | 0.60   |
|  | 標準偏差    | 0.81   | 1.60    | 0.57   | 1.05  | 0.83   | 0.21   |
|  | 平均      | 5.84   | 25.20   | 12.00  | 11.54 | 8.43   | 15.35  |
|  | 差       | -16.16 | -110.80 | -13.00 | -7.46 | -13.57 | 50.35  |
|  | 90° 回転  | -20.80 |         |        |       |        | -39.65 |
|  | MAX-MIN | 2.93   | 1.41    | 6.58   | 11.09 | 4.65   | 0.54   |
|  | 標準偏差    | 1.08   | 0.49    | 2.67   | 4.06  | 1.90   | 0.20   |
|  | 平均      | 6.95   | 22.42   | 16.34  | 15.04 | 9.51   | 15.58  |
|  | 差       | -15.05 | -113.58 | -8.66  | -3.96 | -12.49 | 50.58  |
|  | 90° 回転  | -23.58 |         |        |       |        | -39.42 |
|  | MAX-MIN | 3.26   | 1.33    | 4.25   | 6.48  | 5.66   | 5.24   |
|  | 標準偏差    | 1.20   | 0.54    | 1.83   | 2.38  | 2.60   | 1.85   |
|  | 平均      | 9.28   | 23.09   | 18.06  | 16.90 | 15.32  | 17.45  |
|  | 差       | -12.72 | -112.91 | -6.92  | -2.10 | -6.88  | 52.45  |
|  | 90° 回転  | -22.91 |         |        |       |        | -37.55 |
|  | MAX-MIN | 4.03   | 9.28    | 4.60   | 5.37  | 4.03   | 6.69   |
|  | 標準偏差    | 1.60   | 4.04    | 3.05   | 1.92  | 1.30   | 2.72   |
|  | 平均      | 5.53   | 26.88   | 8.95   | 13.02 | 9.26   | 18.42  |
|  | 差       | -16.47 | -109.12 | -16.05 | -5.98 | -12.74 | 53.42  |
|  | 90° 回転  | -19.12 |         |        |       |        | -36.58 |

|                    |         | HWU    | NWC     | ICV    | GOD    | DHO38  | NAA    |
|--------------------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
|                    | 周波数     |        |         |        |        |        |        |
|                    | 項目      | 18.3   | 19.8    | 20.3   | 22.1   | 23.4   | 24     |
| 2014年04月04日<br>18時 | 観測上の経度  | 22     | 136     | 25     | 19     | 22     | -35    |
|                    | MAX-MIN | 0.94   | 6.71    | 1.94   | 3.57   | 1.85   | 5.87   |
|                    | 標準偏差    | 0.35   | 2.63    | 0.66   | 1.38   | 0.72   | 2.28   |
|                    | 平均      | 2.88   | 26.21   | 8.06   | 8.69   | 8.79   | 17.46  |
|                    | 差       | -19.12 | -109.79 | -16.94 | -10.31 | -13.21 | 52.46  |
|                    | 90° 回転  | -19.79 |         |        |        |        | -37.54 |
|                    | MAX-MIN | 1.37   | 3.42    | 0.69   | 1.81   | 1.14   | 6.82   |
| 2014年04月04日<br>19時 | 標準偏差    | 0.46   | 1.21    | 0.28   | 0.79   | 2.91   | 1.36   |
|                    | 平均      | 2.48   | 22.76   | 7.26   | 6.59   | 11.38  | 23.73  |
|                    | 差       | -19.52 | -113.24 | -17.74 | -12.41 | -10.62 | 50.73  |
|                    | 90° 回転  | -19.24 |         |        |        | 10.10  | -39.27 |
|                    | MAX-MIN | 1.03   | 5.68    | 2.51   | 5.43   | 1.92   | 4.94   |
|                    | 標準偏差    | 0.37   | 2.24    | 0.22   | 1.89   | 3.34   | 1.89   |
|                    | 平均      | 1.91   | 31.10   | 9.38   | 10.32  | 13.24  | 15.76  |
| 2014年04月04日<br>20時 | 差       | -20.09 | -104.90 | -15.62 | -8.68  | -8.76  | 50.76  |
|                    | 90° 回転  | -14.90 |         |        |        |        | -39.24 |
|                    | MAX-MIN | 1.31   | 4.49    | 3.97   | 5.47   | 9.91   | 6.00   |
|                    | 標準偏差    | 0.46   | 1.64    | 1.41   | 1.34   | 3.95   | 5.25   |
|                    | 平均      | 2.27   | 28.12   | 8.38   | 10.43  | 20.22  | 17.84  |
|                    | 差       | -19.73 | -107.88 | -16.62 | -8.57  | -1.02  | 52.84  |
|                    | 90° 回転  | -17.88 |         |        |        |        | -37.16 |
| 2014年04月04日<br>21時 | MAX-MIN | 1.23   | 3.48    | 4.14   | 4.12   | 12.40  | 11.79  |
|                    | 標準偏差    | 0.42   | 1.25    | 1.58   | 1.67   | 4.79   | 4.79   |
|                    | 平均      | 2.85   | 27.15   | 11.15  | 11.38  | 19.21  | 17.13  |
|                    | 差       | -19.15 | -108.85 | -13.85 | -7.62  | -2.97  | 52.13  |
|                    | 90° 回転  | -18.85 |         |        |        |        | -37.87 |
|                    | MAX-MIN | 0.73   | 3.72    | 6.34   | 8.39   | 19.97  | 6.03   |
|                    | 標準偏差    | 0.26   | 1.32    | 2.52   | 3.13   | 7.03   | 2.26   |
| 2014年04月04日<br>23時 | 平均      | 2.63   | 26.61   | 9.39   | 9.92   | 16.94  | 12.55  |
|                    | 差       | -19.37 | -109.39 | -15.61 | -9.08  | -5.06  | 47.55  |
|                    | 90° 回転  | -19.39 |         |        |        |        | -42.45 |
|                    | MAX-MIN | 1.34   | 7.18    | 2.18   | 6.20   | 7.97   | 7.76   |
|                    | 標準偏差    | 0.50   | 2.53    | 0.80   | 2.61   | 2.91   | 2.60   |
|                    | 平均      | 2.80   | 25.89   | 8.45   | 8.71   | 11.75  | 13.04  |
|                    | 差       | -19.20 | -110.41 | -16.55 | -9.29  | -2.95  | 49.03  |
| 2014年04月05日<br>08時 | 90° 回転  | -20.41 |         |        |        |        | -41.97 |
|                    | MAX-MIN | 1.43   | 4.32    | 6.79   | 6.43   | 7.87   | 3.86   |
|                    | 標準偏差    | 0.47   | 1.61    | 2.74   | 2.69   | 3.28   | 1.35   |
|                    | 平均      | 3.06   | 26.81   | 9.34   | 8.71   | 10.11  | 12.81  |
|                    | 差       | -18.94 | -109.19 | -15.66 | -10.29 | -11.89 | 47.81  |
|                    | 90° 回転  | -19.19 |         |        |        |        | -42.19 |
|                    | MAX-MIN | 0.99   | 4.78    | 2.06   | 4.77   | 5.90   | 6.14   |
| 2014年04月05日<br>2時  | 標準偏差    | 0.34   | 1.77    | 0.30   | 1.82   | 2.26   | 2.08   |
|                    | 平均      | 3.90   | 24.56   | 7.20   | 5.55   | 7.28   | 15.36  |
|                    | 差       | -18.10 | -111.44 | -17.80 | -13.45 | -14.72 | 50.36  |
|                    | 90° 回転  | -21.44 |         |        |        |        | -39.64 |
|                    | MAX-MIN | 0.88   | 2.35    | 4.98   | 2.26   | 3.69   | 12.52  |
|                    | 標準偏差    | 0.30   | 0.86    | 1.63   | 0.89   | 1.54   | 5.49   |
|                    | 平均      | 4.02   | 27.56   | 9.03   | 7.43   | 7.54   | 15.30  |
| 2014年04月05日<br>3時  | 差       | -18.18 | -108.44 | -16.97 | -14.17 | -14.56 | 50.36  |
|                    | 90° 回転  | -18.44 |         |        |        |        | -39.64 |

付録表 5 東西成分と南北成分の比による角度の計算(y 成分に係数を乗じた場合)

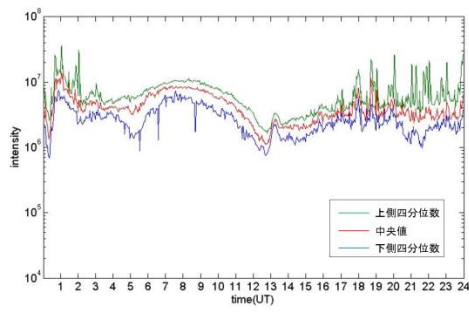
1 月

|                    |         | NWC    | ICV   | HWU   | GQD   | DHO38 | NAA   |       |
|--------------------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    | 周波数     | 19.8   | 20.3  | 21.75 | 19.6  | 22.1  | 23.4  | 24    |
|                    | 観測上の経度  | 136    | 25    | 22    | 19    | 19    | 22    | -35   |
| 2014年01月10日<br>2時  | MAX-MIN | 1.78   | 6.65  | 2.83  | 5.61  | 4.77  | 2.67  | 8.28  |
|                    | 標準偏差    | 0.70   | 2.25  | 1.14  | 2.13  | 1.97  | 1.02  | 3.10  |
|                    | 平均      | 72.13  | 32.57 | 18.61 | 33.85 | 21.32 | 22.54 | 54.43 |
|                    | 差       | -63.87 | 7.57  | -3.89 | 14.85 | 2.92  | 0.54  | 89.43 |
|                    | 90° 回転  | 26.13  | 4.34  | 1.65  | 5.57  | 1.63  | 3.58  | -0.57 |
| 2014年01月10日<br>21時 | MAX-MIN | 2.60   | 4.24  | 1.85  | 5.57  | 1.63  | 3.58  | 7.45  |
|                    | 標準偏差    | 1.14   | 1.60  | 0.65  | 2.43  | 0.55  | 1.34  | 3.24  |
|                    | 平均      | 70.98  | 27.69 | 17.77 | 25.69 | 19.73 | 21.99 | 53.69 |
|                    | 差       | -65.02 | 2.69  | -4.23 | 6.69  | 0.73  | -0.01 | 88.69 |
|                    | 90° 回転  | 24.98  | 2.06  | 1.72  | 1.16  | 4.69  | 3.10  | -1.31 |
| 2014年01月10日<br>22時 | MAX-MIN | 2.06   | 1.72  | 1.16  | 4.69  | 3.10  | 3.75  | 5.05  |
|                    | 標準偏差    | 0.90   | 0.84  | 0.53  | 1.53  | 1.43  | 1.40  | 1.81  |
|                    | 平均      | 69.79  | 25.49 | 19.25 | 22.91 | 21.51 | 24.63 | 48.40 |
|                    | 差       | -66.21 | 0.49  | -2.75 | 3.91  | 2.51  | 2.63  | 83.40 |
|                    | 90° 回転  | 23.79  | 0.91  | 3.22  | 0.67  | 4.12  | 1.99  | -6.60 |
| 2014年01月10日<br>23時 | MAX-MIN | 0.91   | 3.22  | 0.67  | 4.12  | 1.99  | 4.52  | 10.17 |
|                    | 標準偏差    | 0.33   | 1.20  | 0.25  | 1.71  | 0.67  | 1.66  | 4.09  |
|                    | 平均      | 68.83  | 29.52 | 19.04 | 23.78 | 22.48 | 25.22 | 49.28 |
|                    | 差       | -67.17 | 4.52  | -2.96 | 4.78  | 3.48  | 3.22  | 84.28 |
|                    | 90° 回転  | 22.83  | 0.80  | 0.51  | 2.70  | 10.78 | 5.11  | -5.72 |
| 2014年01月11日<br>0時  | MAX-MIN | 0.80   | 0.51  | 2.70  | 10.78 | 5.11  | 5.17  | 4.74  |
|                    | 標準偏差    | 0.31   | 3.71  | 0.90  | 4.01  | 1.84  | 2.09  | 1.87  |
|                    | 平均      | 69.00  | 34.97 | 20.14 | 29.61 | 22.90 | 24.11 | 49.28 |
|                    | 差       | -67.00 | 9.97  | -1.86 | 10.61 | 3.90  | 2.11  | 84.28 |
|                    | 90° 回転  | 23.00  | 0.59  | 6.57  | 1.90  | 4.64  | 3.05  | -5.72 |
| 2014年01月11日<br>1時  | MAX-MIN | 0.59   | 6.57  | 1.90  | 4.64  | 3.05  | 3.90  | 4.15  |
|                    | 標準偏差    | 0.20   | 2.30  | 0.73  | 1.68  | 1.17  | 1.59  | 1.57  |
|                    | 平均      | 68.97  | 41.47 | 22.89 | 35.22 | 25.03 | 29.66 | 49.30 |
|                    | 差       | -67.03 | 16.47 | 0.89  | 16.22 | 6.03  | 7.66  | 84.30 |
|                    | 90° 回転  | 22.97  | 0.54  | 6.01  | 1.69  | 8.80  | 3.01  | -5.70 |
| 2014年01月11日<br>2時  | MAX-MIN | 0.54   | 6.01  | 1.69  | 8.80  | 3.01  | 4.10  | 8.33  |
|                    | 標準偏差    | 0.20   | 2.20  | 0.62  | 3.10  | 0.85  | 1.75  | 3.01  |
|                    | 平均      | 68.93  | 45.30 | 25.96 | 41.70 | 30.02 | 33.26 | 54.94 |
|                    | 差       | -67.07 | 20.30 | 3.96  | 22.70 | 11.02 | 11.26 | 89.94 |
|                    | 90° 回転  | 22.93  | 0.47  | 9.16  | 2.95  | 10.45 | 3.36  | -5.83 |
| 2014年01月11日<br>3時  | MAX-MIN | 0.47   | 9.16  | 2.95  | 10.45 | 3.36  | 5.79  | 5.34  |
|                    | 標準偏差    | 0.17   | 3.55  | 1.02  | 3.87  | 1.40  | 1.93  | 2.09  |
|                    | 平均      | 69.09  | 55.71 | 27.16 | 46.94 | 31.40 | 35.77 | 49.17 |
|                    | 差       | -66.91 | 30.71 | 5.16  | 27.94 | 12.40 | 13.77 | 84.17 |
|                    | 90° 回転  | 23.09  | 0.62  | 5.46  | 6.09  | 14.71 | 14.76 | -5.83 |
| 2014年01月11日<br>4時  | MAX-MIN | 0.62   | 5.46  | 6.09  | 14.71 | 14.76 | 7.97  | 2.30  |
|                    | 標準偏差    | 0.22   | 1.93  | 2.20  | 5.69  | 5.49  | 2.85  | 0.96  |
|                    | 平均      | 68.98  | 64.12 | 28.21 | 58.74 | 42.20 | 40.77 | 51.56 |
|                    | 差       | -67.02 | 39.12 | 6.21  | 39.74 | 23.20 | 18.77 | 86.56 |
|                    | 90° 回転  | 22.98  | 0.54  | 3.61  | 17.90 | 3.00  | 9.64  | -3.44 |
| 2014年01月11日<br>5時  | MAX-MIN | 0.54   | 3.61  | 17.90 | 3.00  | 9.64  | 14.75 | 19.09 |
|                    | 標準偏差    | 0.19   | 1.51  | 7.33  | 1.17  | 3.51  | 5.70  | 2.97  |
|                    | 平均      | 69.14  | 67.35 | 43.41 | 67.10 | 55.04 | 49.02 | 61.26 |
|                    | 差       | -66.86 | 42.35 | 21.41 | 48.10 | 36.04 | 27.02 | 96.26 |
|                    | 90° 回転  | 23.14  |       |       |       |       |       | 6.26  |

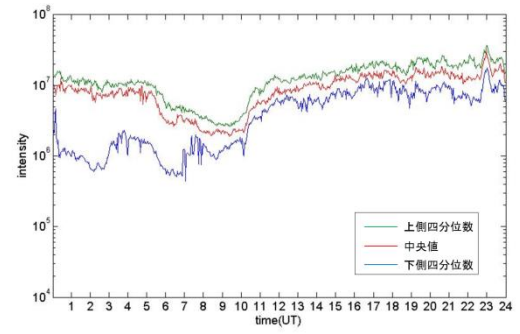
|                    |         | NWC    | ICV   | HWU   |       | GQD   | DHO38 | NAA   |       |
|--------------------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    | 観測上の経度  | 19.8   | 20.3  | 21.75 | 19.8  | 22.1  | 23.4  | 24    |       |
| 2014年01月11日<br>0時  | 観測上の経度  | 136    | 25    | 22    | 19    | 19    | 22    | -35   |       |
|                    | MAX-MIN | 0.44   | 4.07  | 19.57 | 3.19  | 7.03  | 12.72 | 6.64  |       |
|                    | 標準偏差    | 0.18   | 1.56  | 8.38  | 1.18  | 2.84  | 5.18  | 2.45  |       |
|                    | 平均      | 69.07  | 67.41 | 55.68 | 68.93 | 63.23 | 51.76 | 52.98 |       |
|                    | 差       | -66.93 | 42.41 | 33.68 | 49.83 | 44.23 | 29.76 | 87.98 |       |
|                    | 90° 回転  | 23.07  | 4.53  | 9.14  | 11.58 | 5.71  | 18.98 | 9.56  | -2.02 |
| 2014年01月11日<br>16時 | MAX-MIN | 4.53   | 9.14  | 11.58 | 5.71  | 18.98 | 9.56  | 2.99  |       |
|                    | 標準偏差    | 1.77   | 3.30  | 5.06  | 1.93  | 7.28  | 3.09  | 1.05  |       |
|                    | 平均      | 75.19  | 64.83 | 54.48 | 69.50 | 60.44 | 57.07 | 53.39 |       |
|                    | 差       | -60.81 | 39.83 | 32.48 | 50.50 | 41.44 | 35.07 | 88.39 |       |
|                    | 90° 回転  | 29.19  | 1.93  | 10.48 | 21.11 | 4.14  | 10.68 | 14.30 | -1.61 |
|                    | MAX-MIN | 1.93   | 10.48 | 21.11 | 4.14  | 10.68 | 14.30 | 2.53  |       |
| 2014年01月11日<br>17時 | 標準偏差    | 0.75   | 3.64  | 8.35  | 1.45  | 4.33  | 6.21  | 0.95  |       |
|                    | 平均      | 76.99  | 62.16 | 47.69 | 70.92 | 62.87 | 47.82 | 54.22 |       |
|                    | 差       | -59.01 | 37.16 | 25.69 | 51.82 | 43.87 | 25.82 | 89.22 |       |
|                    | 90° 回転  | 30.99  | 0.75  | 3.64  | 8.35  | 1.45  | 4.33  | -0.76 |       |
|                    | MAX-MIN | 0.75   | 3.64  | 8.35  | 1.45  | 4.33  | 6.21  | 0.95  |       |
|                    | 標準偏差    | 0.52   | 4.49  | 2.88  | 7.07  | 5.97  | 3.04  | 0.81  |       |
| 2014年01月11日<br>18時 | 平均      | 75.14  | 50.32 | 26.80 | 58.85 | 41.62 | 32.00 | 54.44 |       |
|                    | 差       | -60.86 | 25.32 | 4.80  | 39.85 | 22.62 | 10.00 | 89.44 |       |
|                    | 90° 回転  | 29.14  | 1.86  | 12.01 | 8.07  | 20.37 | 14.50 | -0.76 |       |
|                    | MAX-MIN | 1.86   | 12.01 | 8.07  | 20.37 | 14.50 | 7.47  | 2.29  |       |
|                    | 標準偏差    | 0.52   | 4.49  | 2.88  | 7.07  | 5.97  | 3.04  | 0.81  |       |
|                    | 平均      | 75.14  | 50.32 | 26.80 | 58.85 | 41.62 | 32.00 | 54.44 |       |
| 2014年01月11日<br>19時 | 差       | -60.86 | 25.32 | 4.80  | 39.85 | 22.62 | 10.00 | 89.44 |       |
|                    | 90° 回転  | 29.14  | 1.86  | 12.01 | 8.07  | 20.37 | 14.50 | -0.76 |       |
|                    | MAX-MIN | 1.86   | 12.01 | 8.07  | 20.37 | 14.50 | 7.47  | 2.29  |       |
|                    | 標準偏差    | 0.43   | 3.46  | 1.44  | 2.67  | 3.14  | 4.47  | 8.25  |       |
|                    | 平均      | 74.25  | 40.56 | 22.21 | 41.56 | 28.84 | 28.04 | 57.94 |       |
|                    | 差       | -61.75 | 15.56 | 0.21  | 22.56 | 9.84  | 6.04  | 92.94 |       |
| 2014年01月11日<br>20時 | 90° 回転  | 28.25  | 5.56  | 2.44  | 9.48  | 3.95  | 3.21  | 2.94  |       |
|                    | MAX-MIN | 5.56   | 2.44  | 9.48  | 3.95  | 3.21  | 9.15  | 9.15  |       |
|                    | 標準偏差    | 2.08   | 2.19  | 0.93  | 3.65  | 1.41  | 1.25  | 3.57  |       |
|                    | 平均      | 73.66  | 38.95 | 18.72 | 30.87 | 23.17 | 23.82 | 62.42 |       |
|                    | 差       | -62.84 | 13.95 | -3.28 | 11.87 | 4.17  | 1.82  | 97.45 |       |
|                    | 90° 回転  | 27.66  | 5.56  | 2.44  | 9.48  | 3.95  | 3.21  | 2.94  |       |
| 2014年01月11日<br>21時 | MAX-MIN | 4.32   | 7.19  | 1.27  | 1.37  | 2.33  | 6.15  | 9.04  |       |
|                    | 標準偏差    | 1.64   | 2.59  | 0.48  | 0.51  | 0.88  | 2.20  | 3.24  |       |
|                    | 平均      | 71.35  | 30.82 | 16.11 | 25.02 | 20.54 | 21.45 | 56.23 |       |
|                    | 差       | -64.85 | 5.62  | -5.89 | 6.02  | 1.54  | -0.56 | 91.23 |       |
|                    | 90° 回転  | 25.85  | 0.57  | 12.63 | 1.28  | 2.23  | 1.45  | 2.48  |       |
|                    | MAX-MIN | 0.57   | 12.63 | 1.28  | 2.23  | 1.45  | 2.48  | 5.18  |       |
| 2014年01月11日<br>22時 | 標準偏差    | 0.20   | 5.62  | 0.48  | 0.51  | 0.89  | 1.00  | 2.11  |       |
|                    | 平均      | 70.01  | 33.38 | 16.69 | 24.66 | 18.95 | 20.75 | 46.51 |       |
|                    | 差       | -65.99 | 8.38  | -5.31 | 5.66  | -0.05 | -1.25 | 81.51 |       |
|                    | 90° 回転  | 24.01  | 0.85  | 5.58  | 0.54  | 2.03  | 2.15  | -0.49 |       |
|                    | MAX-MIN | 0.85   | 5.58  | 0.54  | 2.03  | 2.15  | 3.48  | 6.22  |       |
|                    | 標準偏差    | 0.30   | 2.08  | 0.21  | 0.30  | 0.80  | 1.40  | 2.49  |       |
| 2014年01月11日<br>23時 | 平均      | 69.85  | 50.89 | 17.22 | 30.33 | 20.16 | 21.89 | 48.94 |       |
|                    | 差       | -66.15 | 25.89 | -4.78 | 11.33 | 1.16  | -0.11 | 83.94 |       |
|                    | 90° 回転  | 23.85  |       |       |       |       |       | -6.06 |       |

4 月

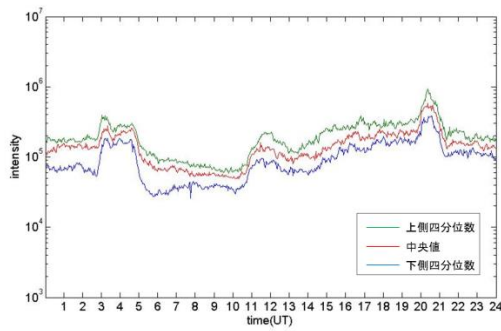
|  |         | HWU   | NWC    | ICV   | GQD   | DHO38 | NAA    |
|--|---------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|
|  | 観測上の経度  | 18.3  | 19.8   | 20.3  | 22.1  | 23.4  | 24     |
|  | 観測上の経度  | 18.3  | 19.8   | 20.3  | 22.1  | 23.4  | 24     |
|  | MAX-MIN | 3.50  | 3.55   | 8.36  | 13.24 | 3.11  | 13.36  |
|  | 標準偏差    | 1.19  | 1.25   | 3.03  | 4.73  | 1.21  | 5.21   |
|  | 平均      | 15.51 | 58.18  | 27.28 | 34.08 | 22.25 | 45.90  |
|  | 差       | -6.49 | -77.82 | 2.28  | 15.08 | 0.26  | 81.90  |
|  | 90° 回転  | 12.18 |        |       |       |       | -8.10  |
|  | MAX-MIN | 4.17  | 0.62   | 8.19  | 10.85 | 2.56  | 2.06   |
|  | 標準偏差    | 1.56  | 0.24   | 3.16  | 4.13  | 0.91  | 0.84   |
|  | 平均      | 15.94 | 58.47  | 31.37 | 31.40 | 22.21 | 44.86  |
|  | 差       | -6.06 | -77.53 | 6.37  | 12.40 | 0.21  | 79.86  |
|  | 90° 回転  | 12.47 |        |       |       |       | -10.14 |
|  | MAX-MIN | 2.56  | 1.53   | 4.08  | 6.15  | 3.57  | 6.46   |
|  | 標準偏差    | 0.89  | 0.52   | 1.47  | 2.39  | 1.19  | 2.59   |
|  | 平均      | 15.02 | 58.05  | 26.30 | 29.63 | 22.62 | 46.04  |
|  | 差       | -6.98 | -77.95 | 1.30  | 10.63 | 0.62  | 81.04  |
|  | 90° 回転  | 12.05 |        |       |       |       | -8.96  |
|  | MAX-MIN | 1.88  | 3.29   | 7.44  | 8.05  | 4.39  | 9.31   |
|  | 標準偏差    | 0.74  | 1.44   | 2.68  | 3.51  | 1.65  | 3.63   |
|  | 平均      | 15.81 | 57.25  | 27.17 | 31.63 | 23.17 | 42.57  |
|  | 差       | -6.19 | -78.75 | 2.17  | 12.63 | 1.17  | 77.57  |
|  | 90° 回転  | 11.25 |        |       |       |       | -12.43 |
|  | MAX-MIN | 1.72  | 3.36   | 3.47  | 8.90  | 2.17  | 3.27   |
|  | 標準偏差    | 0.58  | 1.41   | 1.64  | 3.41  | 0.81  | 1.41   |
|  | 平均      | 14.72 | 62.45  | 27.03 | 28.56 | 22.38 | 42.16  |
|  | 差       | -7.28 | -73.55 | 2.03  | 9.56  | 0.38  | 77.16  |
|  | 90° 回転  | 16.45 |        |       |       |       | -12.84 |
|  | MAX-MIN | 1.94  | 3.88   | 5.54  | 5.19  | 2.60  | 3.36   |
|  | 標準偏差    | 0.71  | 1.48   | 1.81  | 1.74  | 0.95  | 1.25   |
|  | 平均      | 15.54 | 60.23  | 30.84 | 28.45 | 22.47 | 40.98  |
|  | 差       | -6.46 | -75.77 | 5.34  | 10.45 | 0.42  | 75.96  |
|  | 90° 回転  | 14.23 |        |       |       |       | -14.05 |
|  | MAX-MIN | 5.25  | 5.24   | 3.65  | 5.98  | 5.85  | 1.15   |
|  | 標準偏差    | 1.72  | 1.90   | 1.29  | 2.45  | 2.16  | 0.40   |
|  | 平均      | 17.57 | 55.51  | 33.37 | 32.29 | 24.65 | 40.39  |
|  | 差       | -4.43 | -80.49 | 8.37  | 13.29 | 2.65  | 75.39  |
|  | 90° 回転  | 9.51  |        |       |       |       | -14.61 |
|  | MAX-MIN | 8.05  | 1.93   | 12.37 | 20.54 | 11.49 | 1.03   |
|  | 標準偏差    | 2.95  | 0.67   | 5.05  | 7.50  | 4.67  | 0.38   |
|  | 平均      | 20.67 | 51.97  | 42.00 | 39.17 | 27.29 | 40.84  |
|  | 差       | -1.33 | -84.03 | 17.00 | 20.17 | 5.29  | 75.84  |
|  | 90° 回転  | 5.97  |        |       |       |       | -14.16 |
|  | MAX-MIN | 8.46  | 1.79   | 7.33  | 11.39 | 11.10 | 8.75   |
|  | 標準偏差    | 3.13  | 0.72   | 3.17  | 4.20  | 5.12  | 3.07   |
|  | 平均      | 26.81 | 52.88  | 45.23 | 43.08 | 40.08 | 44.15  |
|  | 差       | 4.81  | -83.12 | 20.23 | 24.08 | 18.08 | 79.15  |
|  | 90° 回転  | 6.88  |        |       |       |       | -10.85 |
|  | MAX-MIN | 11.52 | 10.83  | 11.79 | 11.46 | 10.10 | 11.09  |



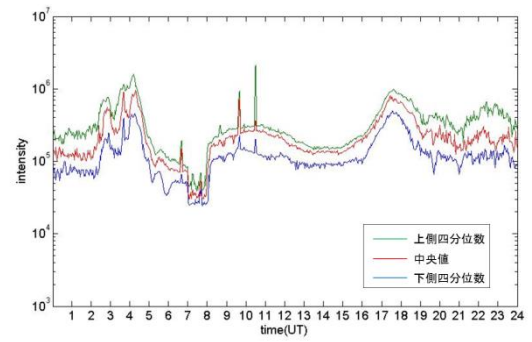
18.36 kHz



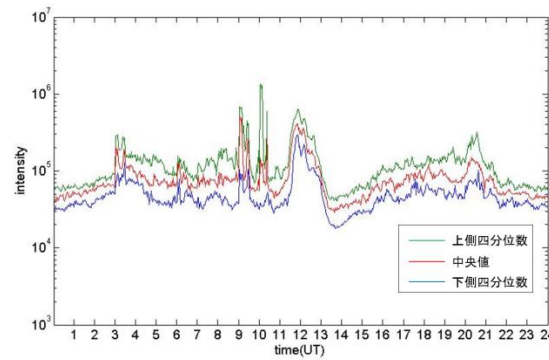
19.92 kHz



22.27 kHz

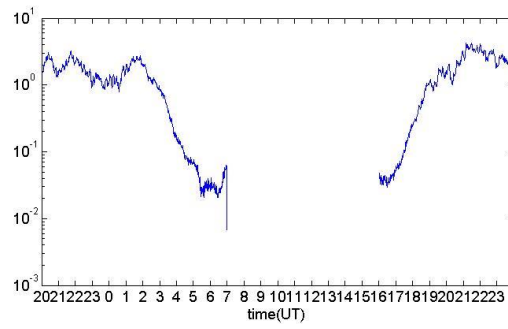
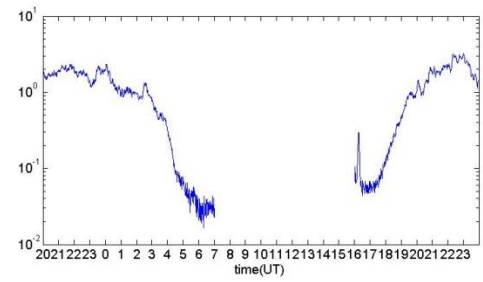
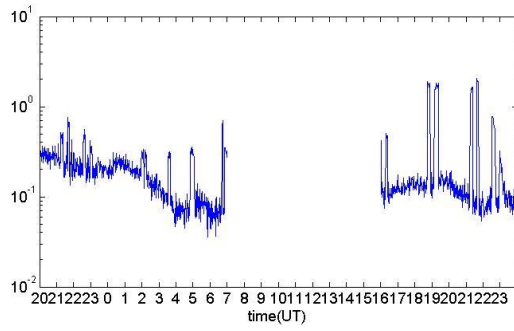
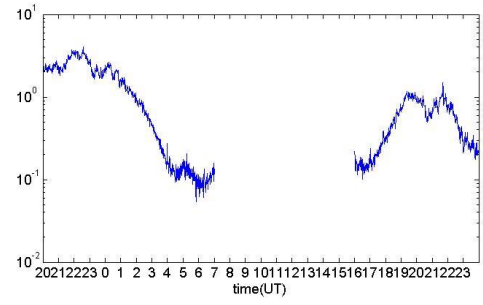
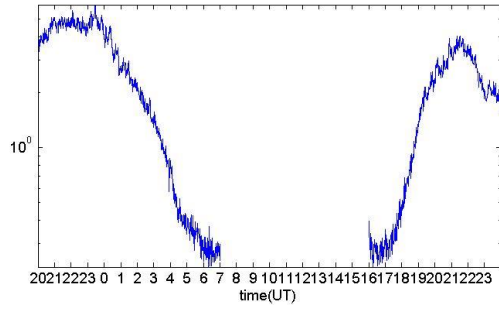


23.44 kHz



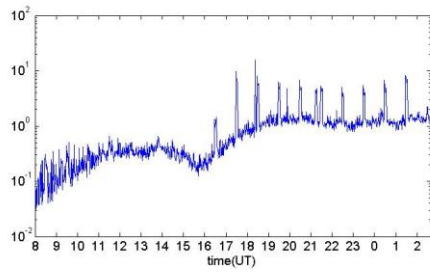
25.00 kHz

付録図 1 2008 年 06 月 18 日と前後 9 日間の中央値と四分位数の日変化

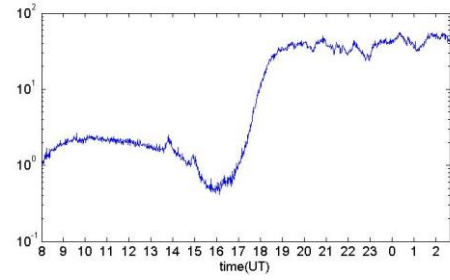


付録図 2 2014 年 1 月 10 日 20 時から翌日にかけての日変化

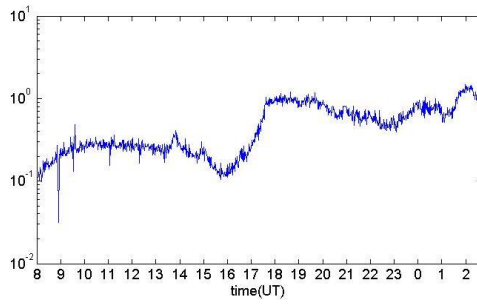




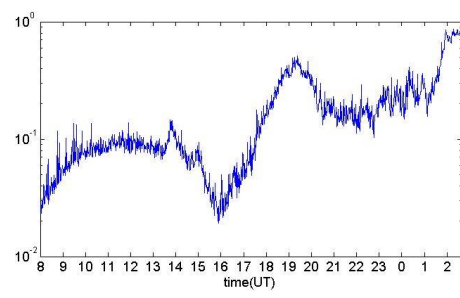
18.10 kHz



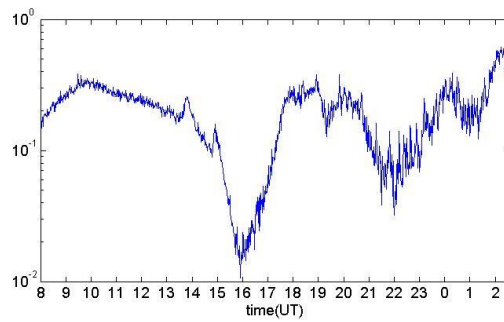
18.30 kHz



20.30 kHz



22.10 kHz



23.40 kHz

付録図 3 2014 年 4 月 4 日 8 時から翌日 3 時にかけての日変化

# 図目次

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 図 1.1  | 電離層擾乱と伝搬経路の変化のイメージ  | 1  |
| 図 1.2  | 電気通信大学が運用している電離層擾乱観測ネットワーク                                      | 2  |
| 図 1.3  | 昭和基地中心の正距方位図と主な VLF 帯電波送信局の位置                                   | 3  |
| 図 1.4  | 電波の伝搬経路   | 4  |
| 図 1.5  | 電離層の構成  | 5  |
| 図 1.6  | 各周波数帯の反射層   | 5  |
| 図 1.7  | VLF 帯電波受信の日変化とターミネータ・タイムの例                                      | 6  |
| 図 1.8  | ループアンテナと電波の進行方向   | 7  |
| 図 1.9  | ループ面と進行方向の角度と磁界の垂直成分  | 8  |
| 図 1.10 | ループアンテナの指向性   | 8  |
| 図 2.1  | 2008 年のデータの解析の流れ  | 10 |
| 図 2.2  | 生データのスペクトル  | 10 |
| 図 2.3  | フィルタを通したスペクトル   | 10 |
| 図 2.4  | 2008 年 6 月 18 日 12 時のスペクトル                                      | 11 |
| 図 2.5  | 2008 年 6 月 18 日 12 時のスペクトル(10 kHz ~ 30 kHz 拡大)                  | 11 |
| 図 2.6  | 2008 年 6 月 18 日のスペクトルとピークの周波数                                   | 12 |
| 図 2.7  | 2008 年 6 月 18 日の日変化(19.92 kHz)                                  | 13 |
| 図 2.8  | 2008 年 6 月 18 日の日変化(20.90 kHz)                                  | 13 |
| 図 2.9  | 2008 年 06 月 18 日と前後 9 日間の中央値と四分位数の日変化 (21.68 kHz)               | 14 |
| 図 2.10 | 2008 年 06 月 18 日と前後 9 日間の中央値と四分位数の日変化<br>とターミネータ・タイム(21.68 kHz) | 14 |
| 図 2.11 | 2008 年 06 月 18 日と前後 9 日間の中央値と四分位数の日変化 (24.22 kHz)               | 15 |
| 図 2.12 | オングル島と受信できる可能性がある送信局の位置および三大雷発生地域                               | 16 |
| 図 3.1  | 2014 年のデータの解析の流れ  | 18 |
| 図 3.2  | 2014 年 1 月 11 日 23 時 0 分の周波数スペクトル                               | 21 |
| 図 3.3  | 2014 年 4 月 4 日 23 時 0 分の周波数スペクトル                                | 22 |
| 図 3.4  | 2014 年 1 月 10 日 20 時から翌日にかけての日変化                                | 24 |
| 図 3.5  | 2014 年 4 月 4 日 8 時から翌日 3 時にかけての日変化                              | 24 |
| 図 3.6  | 2014 年 1 月 10 日から 11 日にかけての日変化と日の出・日没時刻 (19.80 kHz)             | 26 |
| 図 3.7  | 2014 年 1 月 10 日から 11 日にかけての日変化と日の出・日没時刻 (24.00 kHz)             | 26 |
| 図 3.8  | 2014 年 1 月 10 日から 11 日にかけての日変化と日の出・日没時刻 (21.75 kHz)             | 27 |
| 図 3.9  | 2014 年 4 月 4 日から 5 日にかけての日変化と日の出・日没時刻 (24.00 kHz)               | 27 |
| 図 3.10 | 2014 年 4 月 4 日から 5 日にかけての日変化と日の出・日没時刻 (19.80 kHz)               | 28 |



|        |   |              |
|--------|---|--------------|
| 図 3.11 | 2014 年 4 月 4 日から 5 日にかけての日変化と日の出・日没時刻 (18.30 kHz)                                 | ・ ・ 28       |
| 図 3.12 | 2014 年 4 月 4 日から 5 日にかけての日変化 (18.30 kHz)について<br>VTX3 (18.2 kHz)の電波だとした場合の日の出・日没時刻 | ・ ・ ・ ・ ・ 29 |
| 図 3.13 | 昭和基地中心の正距方位図に示したアンテナの基準方角と送信局の方角  | ・ ・ 31       |
| 図 3.14 | 理想的なクロスループアンテナの指向特性   | ・ ・ ・ ・ ・ 31 |
| 図 3.15 | アンテナ設置場所付近の様子   | ・ ・ ・ ・ ・ 33 |
| 図 3.16 | 2014 年 1 月 11 日 23 時 0 分のスペクトル  | ・ ・ ・ ・ ・ 34 |
| 図 4.1  | 2008 年および 2014 年の観測データから同定した送信局と雷地域   | ・ ・ ・ ・ ・ 37 |
| 図 4.2  | 西オングル島に設置するアンテナ概形   | ・ ・ ・ ・ ・ 38 |
| 付録図 1  | 2008 年 06 月 18 日と前後 9 日間の中央値と四分位数の日変化   | ・ ・ ・ ・ ・ 48 |
| 付録図 2  | 2014 年 1 月 10 日 20 時から翌日にかけての日変化  | ・ ・ ・ ・ ・ 49 |
| 付録図 3  | 2014 年 4 月 4 日 8 時から翌日 3 時にかけての日変化  | ・ ・ ・ ・ ・ 50 |

# 表目次

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 表 2.1  | 2008 年のデータ諸元   | 9  |
| 表 2.2  | 図 2.6 中ピークの周波数と該当する送信局   | 12 |
| 表 2.3  | 2008 年のデータ解析によりオングル島で受信できる可能性がある送信局  | 15 |
| 表 3.1  | 2014 年のデータ諸元   | 18 |
| 表 3.2  | 周波数間隔を 0.1 kHz、0.05 kHz、0.025 kHz としたときのピーク値の変化                            | 20 |
| 表 3.3  | 図 3.3 中ピークの周波数と該当する送信局   | 21 |
| 表 3.4  | 図 3.4 中ピークの周波数と該当する送信局   | 22 |
| 表 3.5  | 日変化を作成した周波数  | 23 |
| 表 3.6  | 日変化を作成した結果受信できていると考えられる周波数   | 25 |
| 表 3.7  | 2014 年のデータ解析によりオングル島で受信できる可能性がある送信局  | 29 |
| 表 3.8  | 2014 年のデータの日変化よりオングル島で受信できる可能性がある送信局                                       | 30 |
| 表 3.9  | 東西成分と南北成分の比による送信局の同定計算結果(1 月分)   | 32 |
| 表 3.10 | 東西成分と南北成分の比による送信局の同定計算結果(4 月分)   | 32 |
| 表 3.11 | 東西成分と南北成分の比による送信局の同定計算結果(1 月分)<br>南北成分のアンテナを経度 $0^{\circ}$ 線に沿わせ南極点に置いたと仮定 | 33 |
| 表 3.12 | 東西成分と南北成分の比による送信局の同定計算結果(4 月分)<br>南北成分のアンテナを経度 $0^{\circ}$ 線に沿わせ南極点に置いたと仮定 | 33 |
| 表 3.13 | 東西成分と南北成分の比による送信局の同定計算結果(1 月分)<br>y 成分に係数を乗じた場合                            | 34 |
| 表 3.14 | 東西成分と南北成分の比による送信局の同定計算結果(4 月分)<br>y 成分に係数を乗じた場合                            | 35 |
| 表 3.15 | 2014 年のデータ解析によりオングル島で受信できる可能性がある送信局  | 36 |
| 表 4.1  | 2008 年および 2014 年の観測データの同定結果  | 37 |
| 付録表 1  | 2008 年 6 月の日の出・日没時刻  | 43 |
| 付録表 2  | 2014 年 1 月 10 日 11 日と 4 月 4 日 5 日の日の出・日没時刻                                 | 44 |
| 付録表 3  | 東西成分と南北成分の比による角度の計算  | 45 |
| 付録表 4  | 東西成分と南北成分の比による角度の計算(南極点に置いたと仮定)  | 46 |
| 付録表 5  | 東西成分と南北成分の比による角度の計算(y 成分に係数を乗じた場合)   | 47 |